

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CRISTINA ONO HORITA

ACOPLAMENTO DINÂMICO DE MODELOS HIDRODINÂMICOS TRIDIMENSIONAIS PARA
LANÇAMENTOS DE EFLUENTES VIA EMISSÁRIOS SUBMARINOS OU SUBFLUVIAIS

CURITIBA

2016

CRISTINA ONO HORITA

ACOPLAMENTO DINÂMICO DE MODELOS HIDRODINÂMICOS TRIDIMENSIONAIS PARA
LANÇAMENTOS DE EFLUENTES VIA EMISSÁRIOS SUBMARINOS OU SUBFLUVIAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Tobias Bleninger

Coorientador: Prof. Dr. João Luiz Baptista de Carvalho

CURITIBA

2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

H811a

Horita, Cristina Ono

Acoplamento dinâmico de modelos hidrodinâmicos tridimensionais para lançamentos de efluentes via emissários submarinos ou subfluviais / Cristina Ono Horita. – Curitiba, 2016.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Tobias Bleninger.

Coorientador: Prof. Dr. João Luiz Baptista de Carvalho.

1. Recursos hídricos. 2. Jatos turbulentos. 3. Efluentes domésticos. 4. CORMIX.
5. Delft3D-FLOW. I. Universidade Federal do Paraná. II. Bleninger, Tobias. III. Carvalho, João Luiz Baptista de. IV. Título.

CDD: 627



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROREITORIA DE PESQUISA E POS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL
Código CAPES: 40001016021P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **CRISTINA ONO HORITA**, intitulada: **"Acomplamento Dinâmico de Modelos Hidrodinâmicos Tridimensionais para Lançamentos de Efluentes via Emissários Submarinos ou Subfluviais"**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação.

Curitiba, 19 de Agosto de 2016.

Prof TOBIAS BERNWARD BLENINGER
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

Prof ELOY KAVISKI
Avaliador Interno (UFPR)

Prof FERNANDO OLIVEIRA ANDRADE
Avaliador Interno (UFPR)

*participou por videoconferência**

Prof PAULO CESAR COLONNA ROSMAN

Prof JOÃO LUIZ BAPTISTA DE CARVALHO
Avaliador Externo (UNIVALI)

Prof JAYME PENTO ORTIZ
Avaliador Externo (USP)

** Gustavo C. S. Fernandes
Coordenação*

Ao Franklin, meu amado marido, e aos meus filhos
Samuel, Thiago e Eduardo.

Aos meus pais, Noboru (*in memoriam*) e Terezinha.
Por todo o amor e dedicação.

AGRADECIMENTOS

A gratidão é um dos sentimentos mais nobres que o ser humano pode ter, e neste momento, após uma jornada intensa de estudos e descobertas me sinto realizada e muito grata. Muitas pessoas foram muito importantes nesta jornada e a quem agradeço neste instante, e peço desculpas se eventualmente esquecer de citar algum nome.

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela proteção e pelo apoio nos momentos difíceis.

Agradeço ao professor Tobias Bleninger por ter me aceito como sua primeira aluna de doutorado, pelas orientações presenciais e via Skype, por ter compartilhado comigo parte do seu conhecimento, pelo seu apoio e suas palavras de incentivo e também por sua paciência.

Agradeço ao professor João Luiz Baptista de Carvalho pelo apoio, pelas nossas conversas nas orientações e também por ter me incentivado a iniciar o doutorado no PPGERHA.

Agradeço aos professores Eloy Kaviski e Fernando Oliveira Andrade, por terem formado minha banca permanente, acompanhado e avaliado meu trabalho em todas as bancas (Qualificação I, II, III e Defesa) ao longo destes quatro anos. Suas contribuições foram de extrema relevância. Agradeço também aos professores Paulo Cesar Colonna Rosman e Jayme Pinto Ortiz pelas correções e valiosas contribuições na fase final do trabalho.

Agradeço a MixZon, no nome do Dr. Robert Doneker por ter cedido a licença do CORMIX para a realização do trabalho, assim como por permitir minha participação no curso deste modelo.

Agradeço a Deltares, no nome do Robin Morelissen, não só por ter cedido o código do acoplamento dinâmico, mas também pelo auxílio na implementação do mesmo, no esclarecimento de dúvidas e sugestões.

Agradeço a CAPES e a Univali pelo apoio financeiro.

Agradeço às minhas coordenadoras e amigas da Univali, Kátia, Patty e Janete, pela compreensão e por terem sempre me auxiliado na montagem dos meus horários de aula, possibilitando minhas idas à Curitiba para cumprir as atividades do doutorado.

Agradeço aos novos amigos que fiz durante esta jornada: Aninha, Bruna, Júlio, Anderson e Mayra (minha amiga de “cela”) por nossas conversas, mesmo que esporádicas, foram muito importantes para mim.

Agradeço às antigas alunas da Univali, Letícia e Luciane, que se tornaram minhas amigas por nossos momentos juntas, por terem compartilhado comigo momentos importantes de suas vidas e por terem me auxiliado quando não estava em Curitiba.

Agradeço também meus alunos de IC e orientandos de TCC, Fernando, Maurício, Lais, André, Evandro, Alexandre e Daniel pela paciência, apoio e momentos de descontração. E especialmente a Lediane, que se tornou minha amiga, rezando e me apoiando neste último ano de doutorado.

Agradeço ao David, Cássio e Júlio pelo auxílio com o Matlab, assim como ao Evandro pelo auxílio na elaboração da lista de símbolos.

Agradeço a minha amiga e “irmã” Alcione, pelos momentos preciosos que compartilhamos, nossas conversas, risos e choros.

Agradeço também ao Wallyver, meu pequeno “ser humaninho”, que com sua lealdade e alegria me lembrava de dar uma pausa no trabalho para poder brincar com ele.

Finalmente, agradeço as pessoas mais importantes da minha vida, minha família: meu irmão Beto e sua família, que me ajudaram recebendo meus filhos nas férias, para eu poder me concentrar nas minhas atividades do doutorado; meu pai Noboru, que mesmo não estando mais aqui no plano físico comigo, me acompanhou por todo este caminho; minha mãe Terezinha pelo exemplo de pessoa guerreira, sempre preocupada e disposta a ajudar; meu marido, amigo e companheiro Franklin por todo o apoio em todas as situações que precisei, pelo incentivo ao meu aprimoramento pessoal e profissional e pela enorme paciência e sabedoria que permitiram chegar até aqui; e meus filhos Samuel, Thiago e Eduardo por terem tentado compreender a minha ausência em alguns momentos de sua vida, por serem altruístas, por serem amorosos e carinhosos e por fazerem minha vida valer a pena.

A todos vocês, meu muito obrigada de coração!

"O tempo muito me ensinou:
Me ensinou a amar a vida,
Não desistir de lutar,
Renascer na derrota,
Renunciar às palavras e pensamentos negativos,
Acreditar nos valores humanos,
E a ser otimista.
Aprendi que mais vale tentar do que recuar....
Antes acreditar do que duvidar,
Que o que vale na vida,
Não é o ponto de partida e sim a nossa caminhada"

Cora Coralina

RESUMO

Diferentes modelos têm sido utilizados para simular o comportamento no campo próximo e no campo afastado de jatos e plumas provenientes de emissários submersos devido aos processos de mistura ocorrerem em escalas espaciais e temporais bem distintas. De modo a considerar os efeitos do campo afastado no campo próximo o acoplamento passivo (não dinâmico e em uma direção) entre modelos hidrodinâmicos tem sido utilizado em trabalhos prévios. Mais recentemente, um acoplamento dinâmico utilizando o método de Abordagem Distribuída de Sumidouros por Arraste (DESA) foi proposto para considerar também os efeitos do campo próximo no campo afastado com o modelo CORMIX para o campo próximo e o Delft3D-FLOW para o campo afastado. Desta forma, o objetivo desta tese foi acoplar dinamicamente modelos tridimensionais para lançamentos de efluentes via emissários submersos e analisar as alterações hidrodinâmicas geradas por estes lançamentos quando submetidos a diferentes tipos de acoplamento (nulo, passivo e dinâmico). Estes acoplamentos foram implementados e aplicados em seis casos testes em regime permanente e dois em regime não permanente em um canal retangular de seção transversal constante. Os casos testes foram realizados considerando-se o lançamento de efluentes domésticos em água do mar variando-se a vazão do efluente e a velocidade do escoamento ambiente. Foram aplicados os critérios de estabilidade do campo próximo, quantidade de movimento do lançamento distribuída ao longo da profundidade e de Froude do ambiente para estabelecimento do tipo de acoplamento mais apropriado sendo fornecidos dados do ambiente e do difusor. Também foi analisado se as alterações hidrodinâmicas geradas pelos acoplamentos se refletem na dispersão dos efluentes simulada com abordagem Euleriana e Lagrangeana. Foram determinadas as velocidades induzidas pelo lançamento, as áreas com velocidades induzidas e para quantificar as alterações hidrodinâmicas foram calculadas as porcentagens das áreas com velocidade promediada na vertical induzida. Os resultados demonstram que os diferentes métodos de acoplamento geram distribuições de velocidade distintas especialmente na área adjacente ao campo próximo. A aplicação dos critérios aos casos testes demonstrou que eles devem ser analisados conjuntamente e a sua validação foi realizada confrontando-se com os resultados obtidos de porcentagens de áreas com velocidade induzida. O resultado dos três critérios indicou que o lançamento de efluentes com alta vazão principalmente em escoamentos com baixa velocidade ambiente causaram as maiores alterações hidrodinâmicas e estas se estenderam para regiões além do campo próximo, sendo mais apropriado nestes casos o uso do acoplamento dinâmico. As alterações hidrodinâmicas não apresentaram relação direta com a dispersão dos efluentes lançados.

Palavras-chave: Jatos turbulentos. Efluentes domésticos. Águas de resfriamento. Campo próximo. Campo afastado. CORMIX. Delft3D-FLOW.

ABSTRACT

Different numerical models are used for the near and the far field of outfall discharges as the mixing processes occur in very different spatial and temporal scales. In order to account for the effects of the far field in the near field, the offline coupling method (non-dynamic and one way) has been applied in former studies. More recently, a dynamic and online coupling method had been proposed to also account for the effects of the near field in the far field using the Distributed Entrainment Sink Approach (DESA) method with CORMIX model for the near field and Delft3D-FLOW for the far field. In this way, the objective of this thesis was to couple dynamically tridimensional models for submerge effluent discharges and to analyse the hydrodynamic changes due to those discharges when different coupling methods (no coupling, offline coupling and dynamic coupling) were applied. These coupling methods were implemented and applied to six steady state case tests and two non-steady state case tests in a rectangular channel with constant cross-section. These tests have been made considering a submerged wastewater discharge into sea water, varying the discharge flow and the ambient velocity. An application of the near field stability and the distributed momentum criteria, also the ambient Froude number calculation were accomplished to the tests in order to determine the more appropriate coupling method being provided the ambient and the diffuser data. It was also verified if the hydrodynamic changes would cause modifications in the effluent dispersion when it was simulated with an Eulerian and a Lagrangian approach. It was determined the offline and the dynamic coupling induced velocities, the areas influenced by these velocities and the percentage of the areas with depth average induced velocities to quantify the hydrodynamic modifications. These results showed that different coupling methods had led to distinct results for all tests, especially in the near field region. The application of the criteria to the case tests showed that they should be analyzed together, and these results were compared to the percentage of the areas with depth average induced velocities. The resulting analysis of the three criteria demonstrated that tests with large flow rates or into almost quiescent waters led to hydrodynamic changes beyond the near field and thus should use the dynamic coupling. The effluent dispersion showed no direct relation with the hydrodynamic changes.

Keywords: Turbulent jets. Wastewater discharges. Thermal discharges. Near field. Far field. CORMIX. Delft3D-FLOW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração de um emissário submarino ou subfluvial com sistema de difusores, vista em perfil e em planta.....	40
Figura 2 – Definição da elevação da superfície livre (ζ), cota batimétrica do fundo (d) e profundidade total (H).	42
Figura 3 – Exemplo de discretização vertical usando a coordenada σ com 6 camadas de mesma espessura.	42
Figura 4 – Experimento laboratorial de um jato turbulento inclinado com flutuabilidade positiva em um reservatório estagnado, linearmente estratificado.	45
Figura 5 – Características das trajetórias dos jatos influenciados pela a) densidade ambiente; b) velocidade do escoamento (u_a); c) estratificação do ambiente.	46
Figura 6 – Escalas temporais e espaciais típicas de processos de transporte e mistura, relacionadas à disposição final de efluentes no oceano.	47
Figura 7 – Processos de espalhamento horizontal (espalhamento à montante e lateral) após a região do campo próximo. Vista lateral e em planta de um lançamento de um efluente com flutuabilidade positiva em um ambiente com pequena velocidade ambiente.	52
Figura 8 – Possíveis formas de inserção da massa do poluente (M) e do fluxo da descarga (Q0) no modelo de campo afastado: (I) Massa e fluxo na fonte; (II) fluxo na fonte e massa na altura determinada por um modelo de campo próximo; (III) fluxo e massa diluídos na altura de finalização do campo próximo; (IV) somente massa na finalização do campo próximo. ...	60
Figura 9 – Diagrama conceitual do modelo híbrido proposto por Kim <i>et al.</i> (2002).	62
Figura 10 – Representação dos sumidouros devido ao processo de arraste (Q^e) ao longo da trajetória do jato na grade do modelo do campo afastado juntamente com a localização do ponto de inserção do fluxo de massa diluído.....	65
Figura 11 - Exemplo do esquema de classificação de fluxo do CORMIX.....	71
Figura 12 - Esquema de definição para um difusor multiorifício.	72
Figura 13 – Representação de um jato plano.....	73
Figura 14 - Representação da escala de comprimento LM na transição jato-pluma para um jato, permitindo distinguir entre o comportamento de jato ou pluma.	77
Figura 15 – Classificação de escoamento. Comportamento de descargas com flutuabilidade positiva em ambiente uniforme.	80
Figura 16 – Classificação de escoamento. Comportamento de descargas com flutuabilidade negativa em ambiente uniforme.	81
Figura 17 – Fluxograma do método do acoplamento dinâmico.	88
Figura 18 – Visualização do domínio simplificado: (A) em planta (x, y), (B) em um corte longitudinal (x, z) (C) discretizado com indicações dos contornos abertos (Montante e Jusante) e pontos de observação (Montante, AntesLançamento, Lançamento e Jusante). ...	94

Figura 19 – Visualização tridimensional da linha de difusores utilizada nas simulações com alta vazão de efluente com $\beta = 0^\circ$, $\sigma = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$ e $\gamma = 90^\circ$	95
Figura 20 – Esquema de caracterização dos Casos Testes baseados na combinação escoamento ambiente – vazão do efluente.....	99
Figura 21 – Representação do lançamento dos efluentes, com abordagem Euleriana, para a simulação da dispersão de um traçador conservativo gerado pelo acoplamento passivo (em vermelho, C_{NF} = concentração do traçador ao final do campo próximo, Q_0 = vazão de lançamento) e pelo acoplamento dinâmico (em preto, C_{NF} , Q_0 , Q_E = vazão de diluição).....	100
Figura 22 – Representação do lançamento de efluentes, com abordagem Lagrangeana, para a simulação da dispersão de um traçador conservativo gerado pelos acoplamentos passivo e dinâmico (C_{NF} = concentração do traçador ao final do campo próximo, Q_0 = vazão de lançamento).....	101
Figura 23 – Diagrama de definição dos locais aonde são apresentados os resultados espaciais: ponto de lançamento, eixo x e y do ponto de lançamento, trechos de seções transversais sob influência do lançamento.	103
Figura 24 – Resultados na situação sem lançamentos (base de comparação): (A) Perfis verticais de velocidades para os pontos de observação: Montante, Lançamento e Jusante, com a vazão de $56250 \text{ m}^3/\text{s}$; (B) perfis verticais de densidade nas seções transversais M = 120, 124, 126 e 130.	106
Figura 25 - Velocidades promediadas na vertical na situação sem lançamentos (base de comparação), com campo vetorial sobreposto nas seções transversais em M=120, 124, 126, 130, 140 e 150, onde * indica o ponto de lançamento. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy. Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$	106
Figura 26 - Velocidades da seção longitudinal que contém o ponto de lançamento (*) desde 200 m a montante do lançamento (M=120) até 1300 m a jusante (M=150), com campo vetorial sobreposto. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: $1 \text{ m/s} = 20 \text{ m}$ e escala vertical: 20 vezes maior.	106
Figura 27 – Velocidades da seção transversal que contém o ponto de lançamento (*) com campo vetorial sobreposto. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano yz. Escala horizontal: $1 \text{ m/s} = 10000 \text{ m}$ e escala vertical: 100 vezes maior.	107
Figura 28 – Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo longitudinal passando o ponto de lançamento (M=126, N=20) nas seções transversais M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170 para o caso teste 1 com acoplamento passivo.....	107
Figura 29 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Caso Teste 1) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=120, 124, 126, 130, 140, 150 e 160. Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$	108
Figura 30 - Diferença entre as velocidades da base de comparação e as velocidades do caso teste 1 na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento passivo.	109

Figura 31 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170 para o caso teste 1 para o acoplamento dinâmico. O local do lançamento está indicado por (*).	110
Figura 32 – Pluma simulada apresentando fontes (+) e sumidouros (-) no modelo de campo afastado para uma descarga vertical de efluentes em um ambiente sujeito uma forte velocidade transversal.	111
Figura 33 - Diferença entre as velocidades da base de comparação e as velocidades do caso teste 1 na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento dinâmico.	111
Figura 34 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170 para o caso Teste 2 com acoplamento passivo. O lançamento é feito na meia camada superior da coluna d'água em M=126.	112
Figura 35 – Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de 3,9 m ³ /s (Caso Teste 2) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=120, 124, 126, 130, 140, 150 e 160. Escala dos vetores: 1 m/s = 300 m.	113
Figura 36 – Velocidades na camada do meio do canal geradas por um lançamento de 3,9 m ³ /s (Caso Teste 2) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=120, 124, 126, 130, 140, 150 e 160. Escala dos vetores: 1 m/s = 300 m.	113
Figura 37 - Velocidades na camada de fundo do canal geradas por um lançamento de 3,9 m ³ /s (Caso Teste 2) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=120, 124, 126, 130, 140, 150 e 160. Escala dos vetores: 1 m/s = 500 m.	114
Figura 38 – Velocidades nas seções transversais (A) 200 m (M=130) e (B) 700 m (M=140) a jusante do ponto de lançamento de 3,9 m ³ /s para o acoplamento passivo no caso teste 2. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano yz. Escala horizontal dos vetores: 1 m/s = 300 m e escala vertical dos vetores: 1 m/s = 50 m.	115
Figura 39 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170 para o caso teste 2 com o acoplamento dinâmico. O local do lançamento está indicado por (*).	115
Figura 40 - Velocidades da seção longitudinal que contém o ponto de lançamento (*) e os pontos de retorno de água retirada pelo arraste () (N=20) geradas por um lançamento de 3,9 m ³ /s (caso teste 2) utilizando o acoplamento dinâmico, desde 700 m a montante do lançamento (M=110) até 1300 m a jusante (M=150). Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: 1 m/s = 100 m e escala vertical: 20 vezes maior.	116

- Figura 41 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 2) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 300 \text{ m}$ 117
- Figura 42 - Velocidades na camada do meio do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 2) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 300 \text{ m}$ 118
- Figura 43 - Velocidades na camada do fundo do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 2) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$ 118
- Figura 44 - Velocidades nas seções transversais a (A) 300 m ($M=130$) e a (B) 1300 m ($M=150$) a jusante do ponto de lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ para o acoplamento dinâmico no caso teste 2. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano yz. Escala horizontal dos vetores: (A) $1 \text{ m/s} = 300 \text{ m}$, (B) $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$ e escala vertical dos vetores: $1 \text{ m/s} = 30 \text{ m}$ 119
- Figura 45 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento ($N=20$) nas seções transversais $M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 para o caso Teste 3 com acoplamento passivo. O lançamento é feito na meia camada superior da coluna d'água em $M=126$ 120
- Figura 46 – Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Caso Teste 3) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 700 \text{ m}$ 120
- Figura 47 – Velocidades nas seções transversais a 200 m ($M=130$) a jusante do ponto de lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ para o acoplamento passivo no caso teste 3. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano yz. Escala horizontal dos vetores: $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$ e escala vertical dos vetores: $1 \text{ m/s} = 50 \text{ m}$ 121
- Figura 48 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento ($N=20$) nas seções transversais $M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 para o caso teste 3 com o acoplamento dinâmico. O local do lançamento está indicado por (*). 122
- Figura 49 - Velocidades da seção longitudinal que contém o ponto de lançamento (*) e os pontos de retorno de água retirada pelo arraste () ($N=20$) geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 3) utilizando o acoplamento dinâmico, desde 700 m a montante do lançamento ($M=110$) até 2300 m a jusante ($M=170$). Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: $1 \text{ m/s} = 150 \text{ m}$ e escala vertical: 20 vezes maior. 122

Figura 50 - Velocidades nas seções transversais a (A) 300 m ($M=130$) e a (B) 1300 m ($M=150$) a jusante do ponto de lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ para o acoplamento dinâmico no caso teste 3. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: (A) $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$, (B) $1 \text{ m/s} = 700 \text{ m}$ e escala vertical dos vetores: $1 \text{ m/s} = 50 \text{ m}$123

Figura 51 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 3) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 1000 \text{ m}$ 124

Figura 52 - Velocidades na camada do meio do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 3) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 1000 \text{ m}$125

Figura 53 - Velocidades na camada do fundo do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 3) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 1000 \text{ m}$126

Figura 54 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento ($N=20$) nas seções transversais $M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 para o caso teste 4 com acoplamento passivo. O lançamento é feito na meia camada superior da coluna d'água em $M=126$127

Figura 55 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 4) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$127

Figura 56 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento ($N=20$) nas seções transversais $M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 para o caso teste 4 com o acoplamento dinâmico. O local do lançamento está indicado por (*).128

Figura 57 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 4) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$129

Figura 58 - Velocidades nas seções transversais a 1300 m ($M=150$) a jusante do ponto de lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ para o acoplamento dinâmico no caso teste 4. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: $1 \text{ m/s} = 200 \text{ m}$ e escala vertical dos vetores: $1 \text{ m/s} = 20 \text{ m}$129

Figura 59 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170 para o caso teste 5 com acoplamento passivo. O lançamento é feito na meia camada superior da coluna d'água em M=126.....	130
Figura 60 – Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s (caso teste 5) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=120, 124, 126, 130, 140, 150 e 160. Escala dos vetores: 1 m/s = 500 m.....	131
Figura 61 - Velocidades nas seções transversais a 200 m (M=130) a jusante do ponto de lançamento de 40 m ³ /s para o acoplamento passivo no caso teste 5. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano yz. Escala horizontal dos vetores: 1 m/s = 500 m e escala vertical dos vetores: 1 m/s = 50 m.	131
Figura 62 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170 para o caso teste 5 com o acoplamento dinâmico. O local do lançamento está indicado por (*)......	132
Figura 63 - Velocidades da seção longitudinal que contém o ponto de lançamento (*) e os pontos de retorno de água retirada pelo arraste () (N=20) geradas por um lançamento de 40 m ³ /s (caso teste 5) utilizando o acoplamento dinâmico, desde 700 m a montante do lançamento (M=110) até 2300 m a jusante (M=170). Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: 1 m/s = 80 m e escala vertical: 30 vezes maior.....	133
Figura 64 – Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s (caso teste 5) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 400 m.	135
Figura 65 – Velocidades na camada do meio do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s (caso teste 5) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 400 m.....	135
Figura 66 - Velocidades na camada de fundo do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s (caso teste 5) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 500 m	136
Figura 67 - Perfis verticais de velocidade (A) a montante do lançamento e (B) a jusante do lançamento ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=25) para o caso teste 6 com acoplamento passivo. O lançamento é feito na meia camada superior da coluna d'água em M=125.....	137

Figura 68 – Perfil longitudinal de velocidades ao longo do eixo onde ocorre o lançamento (N=25) entre as seções transversais M=80 e M=170. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano xz. Escala horizontal dos vetores: 1 m/s = 300 m e escala vertical dos vetores: 1 m/s = 30 m. .	138
Figura 69 – Velocidades nas seções transversais a 250 m (M=130) a jusante do ponto de lançamento de 40 m ³ /s para o acoplamento passivo no caso teste 6. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: 1 m/s = 500 m e escala vertical dos vetores: 1 m/s = 50 m.	138
Figura 70 - Velocidades nas seções transversais a 1250 m (M=150) a jusante do ponto de lançamento de 40 m ³ /s para o acoplamento passivo no caso teste 6. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: 1 m/s = 500 m e escala vertical dos vetores: 1 m/s = 50 m.	138
Figura 71 - Diferença entre as velocidades da base de comparação e as velocidades do caso teste 6 na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento passivo.	139
Figura 72 – Perfis verticais de velocidade (A) a montante do lançamento e (B) a jusante do lançamento ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=25) para o caso teste 6 com acoplamento dinâmico.	140
Figura 73 - Velocidades da seção longitudinal que contém os pontos de retorno de água retirada pelo arraste () (N=25) geradas por um lançamento de 40 m ³ /s (caso teste 6) utilizando o acoplamento dinâmico, desde 220 m a montante do lançamento (M=80) até 2300 m a jusante (M=170). Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: 1 m/s = 200 m e escala vertical: 30 vezes maior.	141
Figura 74 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s (caso teste 6) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=80, 84, 90, 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 700 m.	141
Figura 75 - Velocidades na camada do meio do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s (caso teste 6) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=80, 84, 90, 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 700 m.	142
Figura 76 - Velocidades na camada de fundo do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s (caso teste 6) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=80, 84, 90, 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 1000 m.	142
Figura 77 - Velocidades nas seções transversais a 300 m (M=130) a jusante do ponto de lançamento de 40 m ³ /s para o acoplamento passivo no caso teste 6. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos	

no plano yz. Escala horizontal dos vetores: 1 m/s = 500 m e escala vertical dos vetores: 1 m/s = 30 m.	143
Figura 78 – Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=39) nas seções transversais M = 218, 238, 246, 250, 258, 278, 298 e 318 para o caso teste 1 com o acoplamento dinâmico e grade refinada. O local do lançamento está indicado por (*).	143
Figura 79 – Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=11) nas seções transversais M = 56, 61, 63, 64, 66, 71, 76 e 81 para o caso teste 1 com o acoplamento dinâmico e a grade grosseira. O local do lançamento está indicado por (*).	144
Figura 80 – Distribuição de concentrações de um traçador conservativo na seção longitudinal que contém o ponto de lançamento desde 200 m antes até 1300 m após a descarga de efluentes. (A) Grade refinada, (B) Grade normal e (C) Grade grosseira.	146
Figura 81 – Gráficos da porcentagem da área com velocidade induzida com relação a velocidade de excedência de 1, 5 e 10% para os diferentes casos testes com (A) acoplamento dinâmico e (B) acoplamento passivo.....	149
Figura 82 – Gráficos da porcentagem da área com velocidade induzida em função dos casos testes com os diferentes tipos de acoplamento para as velocidades de excedência de (A) 1%, (B) 5% e (C) 10%.....	150
Figura 83 - Elevação do nível d'água (m) ao longo do tempo de execução do Delft3D, obtido nos pontos de observação pela imposição das condições de contorno, sem a presença do emissário (base de comparação).....	151
Figura 84 - Velocidade promediada na vertical ao longo do tempo de execução do Delft3D, obtido nos pontos de observação Montante, Lançamento, AntesLançamento, Jusante.	152
Figura 85 - Campo de velocidades promediadas na vertical com direção de montante para jusante, para o instante de 15 horas após o início da execução do modelo Delft3D.....	152
Figura 86 - Campo de velocidades promediadas na vertical com direção de jusante para montante, para o instante de 18 horas após o início da execução do modelo Delft3D.....	152
Figura 87 – Velocidades promediadas na vertical 12 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de (A) 3,9 m ³ /s e (B) 40 m ³ /s com acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160, 170 e 180. Escala dos vetores: 1 m/s = 100 m.	154
Figura 88 – Velocidades promediadas na vertical 15 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de (A) 3,9 m ³ /s e (B) 40 m ³ /s com acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160, 170 e 180. Escala dos vetores: 1 m/s = 100 m.	155
Figura 89 – Velocidades promediadas na vertical 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de (A) 3,9 m ³ /s e (B) 40 m ³ /s com acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as	

setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160, 170 e 180. Escala dos vetores: 1 m/s = 10000 m.156

Figura 90 – Velocidades promediadas na vertical 21 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de (A) 3,9 m³/s e (B) 40 m³/s com acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160, 170 e 180. Escala dos vetores: 1 m/s = 100 m.158

Figura 91 - Velocidades promediadas na vertical 12 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de 3,9 m³/s com acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 120, 124, 126, 130, 140 e 150. Escala dos vetores: 1 m/s = 100 m. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.....159

Figura 92 - Diferença absoluta entre as velocidades promediadas na vertical obtidas com o acoplamento dinâmico para o caso teste 1 do regime permanente e com o acoplamento dinâmico para o caso em regime não permanente 12 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, ambas geradas por um lançamento de 3,9 m³/s. Retângulos em vermelho indicam descontinuidades na velocidade geradas no caso em regime não permanente.....160

Figura 93 - Velocidades promediadas na vertical 15 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de 3,9 m³/s com acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 120, 124, 126, 130, 140 e 150. Escala dos vetores: 1 m/s = 100 m. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.....160

Figura 94 – Visualização do comportamento da pluma, do ponto de lançamento ao final do campo próximo, gerada pelo CORMIX. Escala y:x = 0,37 e z:x = 0,35.161

Figura 95 - Velocidades promediadas na vertical 21 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de 3,9 m³/s com acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 120, 124, 126, 130, 140 e 150. Escala dos vetores: 1 m/s = 100 m. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.....161

Figura 96 - Velocidades da seção longitudinal que contém (A) o ponto de lançamento (*) (N=19) e (B) o ponto de retorno de água retirada pelo arraste (*) (N=21) geradas por um lançamento de 3,9 m³/s utilizando o acoplamento dinâmico para instante de 18 h após o início da execução do modelo, desde 700 m a montante do lançamento (M=110) até 1300 m a jusante (M=150). Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: 1 m/s = 500 m e escala vertical: 20 vezes maior.162

Figura 97 – Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de fundo do canal geradas por um lançamento de 3,9 m³/s utilizando o acoplamento dinâmico. cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=110,

120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 5000 m. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.	162
Figura 98 – Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada do meio do canal geradas por um lançamento de 3,9 m ³ /s utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 5000 m. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.	163
Figura 99 - Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de 3,9 m ³ /s utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 5000 m. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.	164
Figura 100 - Diferença absoluta entre as velocidades base de comparação e as obtidas com o acoplamento dinâmico para 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, para um lançamento de 3,9 m ³ /s.	165
Figura 101 - Velocidades 12 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de (A) fundo, (b) meio e (C) superfície do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 120, 124, 126, 130, 140, 150 e 160. Escala dos vetores: 1 m/s = 100 m. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento. .	166
Figura 102 - Diferença absoluta entre as velocidades da base de comparação e as obtidas com o acoplamento dinâmico promediadas na vertical para 12 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, para um lançamento de 40 m ³ /s.	167
Figura 103 - Velocidades 15 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de (A) fundo, (b) meio e (C) superfície do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150 e 160. Escala dos vetores: 1 m/s = 200 m. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento. .	168
Figura 104 - Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de fundo do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 2000 m.	169
Figura 105 - Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada do meio do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 3000 m.	170
Figura 106 - Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de 40 m ³ /s utilizando o	

acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 2000 \text{ m}$170

Figura 107 - Velocidades 21 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de (A) fundo, (b) meio e (C) superfície do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M = 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 200 \text{ m}$. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento. .171

Figura 108 - Diferença entre o campo de velocidades, 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, utilizando um passo de tempo do acoplamento de 30 minutos e 90 minutos para um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento dinâmico.....173

Figura 109 - Diferença entre o campo de velocidades, 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, utilizando um passo de tempo do acoplamento de 30 minutos e 180 minutos para um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento dinâmico no instante.....174

Figura 110 - Diferença entre o campo de velocidades, 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, utilizando um passo de tempo do acoplamento de 30 minutos e 45 minutos para um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento dinâmico no instante.....174

Figura 111 – Gráfico de correlação entre o critério da quantidade de movimento distribuída ao longo da profundidade e a porcentagem da área com velocidade induzida.....178

Figura 112 – Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento passivo e a abordagem Euleriana para $Q_0 = 3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) $1,0 \text{ m/s}$ (caso teste 1), (B) $0,25 \text{ m/s}$ (caso teste 2) e, (C) $0,11 \text{ m/s}$ (caso teste 3).181

Figura 113 – Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento passivo e a abordagem Euleriana para $Q_0 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) $1,0 \text{ m/s}$ (caso teste 4), (B) $0,25 \text{ m/s}$ (caso teste 5) e, (C) $0,11 \text{ m/s}$ (caso teste 6).183

Figura 114 - Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento dinâmico e a abordagem Euleriana para $Q_0 = 3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) $1,0 \text{ m/s}$ (caso teste 1), (B) $0,25 \text{ m/s}$ (caso teste 2) e, (C) $0,11 \text{ m/s}$ (caso teste 3).184

Figura 115 - Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento dinâmico e a abordagem Euleriana para $Q_0 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) $1,0 \text{ m/s}$ (caso teste 5), (B) $0,25 \text{ m/s}$ (caso teste 5) e, (C) $0,11 \text{ m/s}$ (caso teste 6).186

Figura 116 – Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento dinâmico e a abordagem Lagrangeana

para $Q_0 = 3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 1), (B) 0,25 m/s (caso teste 2) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 3).....	188
Figura 117 – Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento passivo e a abordagem Lagrangeana para $Q_0 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 4), (B) 0,25 m/s (caso teste 5) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 6).	189
Figura 118 - Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento dinâmico e a abordagem Lagrangeana para $Q_0 = 3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 1), (B) 0,25 m/s (caso teste 2) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 3).....	191
Figura 119 - Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento dinâmico e a abordagem Lagrangeana para $Q_0 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 4), (B) 0,25 m/s (caso teste 5) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 6).....	192
Figura 120 – Gráficos comparativos entre as concentrações determinadas pelo CORMIX e as obtidas com o acoplamento passivo e dinâmico para (A) caso teste 1, (B) caso teste 2, (C) caso teste 3, (D) caso teste 4, (E) caso teste 5 e (F) caso teste 6.	195
Figura 121 – Sobreposição do campo de velocidades, isolinhas de concentração Euleriana (-) e isolinhas de concentração Lagrangeana (--) em um trecho da seção longitudinal aonde se localiza o ponto de lançamento (N=20) obtido com o acoplamento (A) passivo e (B) dinâmico para o caso teste 1. Os vetores estão projetados no plano xz com escala horizontal de 1 m/s = 20m e escala vertical 20 vezes maior do que a escala horizontal.....	196
Figura 122 - Sobreposição do campo de velocidades, isolinhas de concentração Euleriana (-) e isolinhas de concentração Lagrangeana (--) em um trecho da seção longitudinal aonde se localiza o ponto de lançamento (N=20) obtido com o acoplamento (A) passivo e (B) dinâmico para o caso teste 6. Os vetores estão projetados no plano xz com escala horizontal de 1 m/s = 200m e escala vertical 30 vezes maior do que a escala horizontal.....	196
Figura 123 - Esquema de representação dos sistemas de coordenadas local (s, r) e Cartesiano (x, y, z) para o modelo integral de jato flutuante.....	212
Figura 124 - Representação esquemática de um volume de controle de um jato flutuante usado para derivar as equações governantes de conservação de um modelo de jato integral.	214
Figura 125 – Velocidade induzida obtida para o caso teste 1 (A) com o acoplamento dinâmico na camada da superfície do canal (L1), (B) com o acoplamento passivo na camada da superfície do canal (L1), (C) com o acoplamento dinâmico na camada do meio do canal (L5), (D) com o acoplamento passivo na camada do meio do canal (L5), (E) com o acoplamento dinâmico na camada de fundo do canal (L10), (F) com o acoplamento passivo na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas representam a magnitude da velocidade e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade. Escala do vetor: $1 \text{ ms}^{-1} = 500 \text{ m}$ (acoplamento dinâmico), $1 \text{ ms}^{-1} = 3000 \text{ m}$ (acoplamento passivo).	223
Figura 126 – Velocidade induzida obtida para o caso teste 2 (A) na superfície do canal (L1), (B) na camada do meio do canal (L5), (C) na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas	

representam a magnitude da velocidade, (—) acoplamento dinâmico e (:) acoplamento passivo, e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade, (←) acoplamento dinâmico, (↖) acoplamento passivo. Escala dos vetores: $1 \text{ ms}^{-1} = 2000 \text{ m. ...}$ 224

Figura 127 – Velocidade induzida obtida para o caso teste 3 (A) na superfície do canal (L1), (B) na camada do meio do canal (L5), (C) na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas representam a magnitude da velocidade, (—) acoplamento dinâmico e (:) acoplamento passivo, e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade, (←) acoplamento dinâmico, (↖) acoplamento passivo. Escala dos vetores: $1 \text{ ms}^{-1} = 1000 \text{ m. ...}$ 225

Figura 128 - Velocidade induzida obtida para o caso teste 4 (A) na superfície do canal (L1), (B) na camada do meio do canal (L5), (C) na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas representam a magnitude da velocidade, (—) acoplamento dinâmico e (:) acoplamento passivo, e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade, (←) acoplamento dinâmico, (↖) acoplamento passivo. Escala dos vetores: $1 \text{ ms}^{-1} = 1000 \text{ m. ...}$ 226

Figura 129 - Velocidade induzida obtida para o caso teste 5 (A) na superfície do canal (L1), (B) na camada do meio do canal (L5), (C) na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas representam a magnitude da velocidade, (—) acoplamento dinâmico e (:) acoplamento passivo, e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade, (←) acoplamento dinâmico, (↖) acoplamento passivo. Escala dos vetores: $1 \text{ ms}^{-1} = 500 \text{ m.}$ 227

Figura 130 - Velocidade induzida obtida para o caso teste 6 (A) na superfície do canal (L1), (B) na camada do meio do canal (L5), (C) na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas representam a magnitude da velocidade, (—) acoplamento dinâmico e (:) acoplamento passivo, e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade, (←) acoplamento dinâmico, (↖) acoplamento passivo. Escala dos vetores: $1 \text{ ms}^{-1} = 1000 \text{ m. ...}$ 228

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das escalas de comprimento e suas respectivas expressões.....	77
Tabela 2 - Descrição das escalas de tempo e suas respectivas expressões.	78
Tabela 3 – Largura da área da pluma ao final do campo próximo para caso teste e localização das fontes para representar esta área em coordenadas locais.	87
Tabela 4 – Dados de entrada utilizados nos casos testes dos acoplamentos nulo, passivo e dinâmico aplicados ao domínio simplificado em casos permanentes simulando o lançamento de efluentes com flutuabilidade positiva em água do mar.....	95
Tabela 5 – Condições de fluxo impostas como condição de contorno à montante e à jusante no regime não permanente.....	98
Tabela 6 - Resumo dos resultados dos casos testes aplicados a um escoamento em regime permanente.	148
Tabela 7 – Variação das velocidades promediadas na vertical ao longo do canal nos instantes 12h, 15h, 18h e 21h.	154
Tabela 8 – Porcentagem da área com velocidade induzida e máxima velocidade induzida obtida com as diferentes formas de acoplamento nos instantes 12, 15, 18 e 21 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico para lançamentos de baixa e alta vazão.	175
Tabela 9 – Resultados do critério de instabilidade do campo próximo (critério 1), critério da quantidade de movimento distribuída ao longo da profundidade (critério 2) e critério de Froude (F_a) dos casos testes.	176
Tabela 10 – Porcentagens da área com velocidade induzida obtida com o acoplamento dinâmico e passivo com velocidades induzidas superiores a 1, 5 e 10% da velocidade média da base de comparação de caso teste.	177
Tabela 11 – Aplicação da expressão do critério de estabelecimento do acoplamento apropriado a emissários reais.....	179
Tabela 12 – Concentrações promediadas na vertical máximas obtidas com o acoplamento passivo e dinâmico.	180
Tabela 13 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de 3,9 m ³ /s, acoplamento passivo e abordagem Euleriana para diferentes velocidades ambiente.....	182
Tabela 14 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de 40 m ³ /s, acoplamento passivo e abordagem Euleriana para diferentes velocidades ambiente.....	183
Tabela 15 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de 3,9 m ³ /s, acoplamento dinâmico e abordagem Euleriana para diferentes velocidades ambiente.....	185

Tabela 16 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de 40 m ³ /s, acoplamento dinâmico e abordagem Euleriana para diferentes velocidades ambiente.....	186
Tabela 17 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de 3,9 m ³ /s, acoplamento passivo e abordagem Lagrangeana para diferentes velocidades ambiente.....	188
Tabela 18 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de 40 m ³ /s, acoplamento passivo e abordagem Lagrangeana para diferentes velocidades ambiente.....	190
Tabela 19 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de 3,9 m ³ /s, acoplamento dinâmico e abordagem Lagrangeana para diferentes velocidades ambiente.....	191
Tabela 20 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de 40 m ³ /s, acoplamento dinâmico e abordagem Lagrangeana para diferentes velocidades ambiente.....	192
Tabela 21 – Porcentagens das áreas e concentrações promediadas na vertical induzidas geradas pelos casos testes com o acoplamento dinâmico.	197
Tabela 22 – Porcentagens das áreas e concentrações promediadas na vertical induzidas geradas pelos casos testes com o acoplamento passivo.	197

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros do arquivo de entrada de dados para a execução do CorTIME.	90
Quadro 2 – Localização e definição das seções transversais utilizadas nos resultados espaciais para a grade normal, mais refinada e mais grosseira.	103

LISTA DE SÍMBOLOS

a_0	(m ²)	Área da seção transversal do somatório dos jatos
B	(m)	Largura equivalente da linha de difusores
BH	(m)	Meia largura da pluma no campo próximo
BV	(m)	Altura pluma no campo próximo
c	(kg/m ³)	Concentração de uma substância
C_0	(kg/m ³)	Concentração de lançamento
d	(m)	Cota batimétrica do fundo
D_0	(m)	Diâmetro do difusor
D_H, D_V	(m ² /s)	Coeficiente de difusividade turbulenta
f	(s ⁻¹)	Parâmetro de Coriolis ou Frequência inercial
F_a	(-)	Número de Froude do ambiente
g	(m/s ²)	Aceleração da gravidade
g'_0	(m/s ²)	Gravidade reduzida do lançamento $g' = g \Delta\rho/\rho$
H	(m)	Profundidade total
h_0	(m)	Altura da descarga com relação ao leito do ambiente ou altura do orifício
h_e	(m)	Altura acima da descarga até o ponto de diluição mínima
j_0	(m ³ /s ³)	Fluxo de flutuabilidade inicial por unidade de comprimento do difusor
k	(s ⁻¹)	Coeficiente de decaimento de primeira ordem
l	(m)	Espaçamento médio entre difusores ou orifícios
l_a	(m)	Escala de comprimento escoamento transversal/estratificação $l_a = u_a / \varepsilon^{1/2}$
l'_b	(m)	Escala de comprimento pluma/estratificação $l'_b = j_0^{1/3} / \varepsilon^{1/2}$
L_D	(m)	Comprimento do difusor
l_m	(m)	Escala de comprimento jato/fluxo transversal $l_m = m_0 / u_a^2$
l_M	(m)	Escala de comprimento jato/pluma $l_M = m_0 / j_0$
l'_m	(m)	Escala de comprimento jato/estratificação $l'_m = m_0^{1/3} / j_0^{1/3}$
M, N, K		Coordenadas locais da grade do Delft3D-FLOW
M_u, M_v	(m/s ²)	Contribuições devido a fontes/sumidouros externos de quantidade de movimento
m_0	(m ³ /s ²)	Fluxo de quantidade de movimento inicial por unidade de comprimento do difusor
N	(s ⁻¹)	Frequência de Brunt-Vaisalla
p	(kg/m.s ²)	Pressão

p_a	(kg/m.s ²)	Pressão atmosférica
Q_c	(kg/m ³ .s)	Fluxo de massa da fonte/sumidouro de soluto ou traçador por unidade de volume
Q_S	(1/s)	Fluxo volumétrico da fonte/sumidouro por unidade de volume
Q_0	(m ³ /s)	Fluxo volumétrico total inicial
q_0	(m ² /s)	Fluxo volumétrico inicial por unidade de comprimento do difusor
Q^e	(m ³ /s)	Fluxo de arraste
s	(ups)	Salinidade
T	(°C)	Temperatura
t_M	(s)	Escala de tempo jato/pluma $t_M = m_0 / j_0$
t_m	(s)	Escala de tempo jato/fluxo transversal $t_m = m_0 / u_a^3$
u, v, w	(m/s)	Velocidade
u_0	(m/s)	Velocidade de lançamento ou de saída do orifício
u_a	(m/s)	Velocidade do escoamento ambiente
x, y, z	(m)	Coordenadas cartesianas
z_e	(m)	Altura até o topo da camada de efluente
z_m	(m)	Altura da descarga até o ponto de diluição mínima
Z_m	(m)	Profundidade de estabilização do jato
Z_t	(m)	Altura terminal do escoamento
β	(°)	Ângulo de orientação do difusor
γ_0	(°)	Ângulo de alinhamento entre a linha de difusores e a direção da corrente ambiente
ε	(s ⁻²)	Parâmetro de estratificação $\varepsilon = -(g\rho_a)(d\rho_a/dz)$
λ_d	(s ⁻¹)	Coeficiente de decaimento de primeira ordem
θ_0	(°)	Ângulo vertical de descarga
ν_H, ν_V	(m ² /s)	Viscosidade turbulenta
ρ	(kg/m ³)	Densidade da mistura
ρ_0	(kg/m ³)	Densidade de referência
ρ_0	(kg/m ³)	Densidade do efluente
ρ_a	(kg/m ³)	Densidade ambiente
σ_0	(°)	Ângulo horizontal entra a projeção de descarga e o eixo x
ζ	(m)	Elevação da superfície livre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	32
1.1	GERAL	32
1.2	QUESTÕES E HIPÓTESES	35
1.3	OBJETIVOS.....	36
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	37
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	39
2.1	EMISSÁRIOS	39
2.2	SISTEMA DE COORDENADAS E EQUAÇÕES GOVERNANTES	41
2.3	DESCRIÇÃO E MODELAGEM DOS PROCESSOS DE MISTURA	44
2.3.1	Campo próximo	44
2.3.1.1	Modelos de campo próximo.....	47
2.3.2	Campo intermediário.....	51
2.3.2.1	Modelos de campo intermediário	53
2.3.3	Campo afastado	54
2.3.3.1	Modelos de campo afastado	54
2.4	FORMAS DE ACOPLAMENTO.....	57
2.4.1	Acoplamento nulo	58
2.4.2	Acoplamento passivo.....	59
2.4.3	Acoplamento dinâmico.....	64
2.5	CRITÉRIOS PARA O ESTABELECIMENTO DO TIPO DE ACOPLAMENTO	67
2.6	RESUMO DOS MÉTODOS DE ACOPLAMENTO	68
3	MODELOS E MÉTODOS	70
3.1	MODELOS	70
3.1.1	CORMIX	70
3.1.1.1	Jatos com fluutuabilidade proveniente de multiorifícios	71
3.1.1.2	CorTIME	82
3.1.2	Delft3D.....	83
3.1.2.1	Delft3D-FLOW	83
3.1.2.2	Delft3D-PART	85
3.2	MÉTODOS	86
3.2.1	Acoplamento nulo	86
3.2.2	Acoplamento passivo.....	86

3.2.3	Acoplamento dinâmico.....	88
3.3	COMPLEMENTOS	93
3.3.1	Domínio Genérico Simplificado	93
3.3.2	Análise das Alterações Hidrodinâmicas	98
3.3.3	Critérios para o Estabelecimento do Tipo de Acoplamento	99
3.3.4	Análise da Dispersão.....	99
3.3.4.1	Abordagem Euleriana	100
3.3.4.2	Abordagem Lagrangeana.....	101
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	103
4.1	ESTUDO DE CASOS EM REGIME PERMANENTE	104
4.2	CONFORME APRESENTADO NO COMPLEMENTOS.....	104
4.2.1	Base de comparação.....	105
4.2.2	Caso teste 1.....	107
4.2.2.1	Acoplamento nulo e passivo.....	107
4.2.2.2	Acoplamento dinâmico.....	109
4.2.3	Caso teste 2.....	112
4.2.3.1	Acoplamento nulo e passivo.....	112
4.2.3.2	Acoplamento dinâmico.....	115
4.2.4	Caso teste 3.....	119
4.2.4.1	Acoplamento nulo e passivo.....	119
4.2.4.2	Acoplamento dinâmico.....	121
4.2.5	Caso teste 4.....	126
4.2.5.1	Acoplamento nulo e passivo.....	126
4.2.5.2	Acoplamento dinâmico.....	128
4.2.6	Caso teste 5.....	130
4.2.6.1	Acoplamento nulo e passivo.....	130
4.2.6.2	Acoplamento dinâmico.....	132
4.2.7	Caso teste 6.....	136
4.2.7.1	Acoplamento nulo e passivo.....	136
4.2.7.2	Acoplamento dinâmico.....	139
4.2.8	Análise de sensibilidade.....	143
4.3	RESUMO DOS RESULTADOS DOS CASOS EM REGIME PERMANENTE	147
4.4	ESTUDO DE CASOS EM REGIME NÃO PERMANENTE	151
4.4.1	Base de comparação.....	151
4.4.2	Acoplamento nulo e passivo	153

4.4.3	Acoplamento dinâmico	158
4.4.3.1	Baixa vazão de efluentes	159
4.4.3.2	Alta vazão de efluentes	165
4.4.4	Análise de sensibilidade	172
4.5	RESUMO DOS RESULTADOS DOS CASOS NÃO PERMANENTES	175
4.6	ANÁLISE E DEFINIÇÃO DE ESCALAS CARACTERÍSTICAS	176
4.7	ANÁLISE DA DISPERSÃO	179
4.7.1	Abordagem Euleriana	180
4.7.2	Abordagem Lagrangeana	187
4.7.3	Comparação com resultados do CORMIX.....	193
4.8	RESUMO DA ANÁLISE DA DISPERSÃO.....	195
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	199
5.1	CONCLUSÕES	199
5.2	RECOMENDAÇÕES.....	201
	REFERÊNCIAS.....	202
	APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DOS MODELOS INTEGRAIS DE CAMPO PRÓXIMO	208
	APÊNDICE B - DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE CAMPO AFASTADO.....	210
	APÊNDICE C - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO CORJET	212
	APÊNDICE D – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO DELFT3D-FLOW	216
	APÊNDICE E – EXEMPLO DO ARQUIVO DE ENTRADA CORINP.DAT	221
	APÊNDICE F – VELOCIDADES INDUZIDAS POR CAMADAS PARA CADA CASO TESTE	222

1 INTRODUÇÃO

1.1 GERAL

O crescimento populacional acelerado observado nas últimas décadas tem gerado uma crescente pressão sobre os recursos naturais referente à exploração dos mesmos para geração de energia, água potável, matérias primas, produtos industrializados entre vários outros, assim como a servir de corpo receptor de efluentes líquidos e gasosos inerentes aos processos acima citados.

Ao longo da história, corpos d'água naturais e artificiais como rios, lagos, reservatórios, estuários e zonas costeiras vêm sendo utilizados para o recebimento destes efluentes por apresentarem capacidade de autodepuração. Com o aumento da população estes lançamentos configuram uma preocupação tanto ambiental como de saúde pública pois, geram impactos ambientais que precisam ser minimizados para possibilitar um ambiente saudável para as gerações atuais e futuras.

Além de efluentes de estações de tratamento de esgoto domésticos é importante considerar efluentes oriundos de atividades industriais (por exemplo, terminais de gás líquido lançando águas frias ou efluentes de indústrias químicas ou de petróleo), de plantas de dessalinização (salmoura) e águas de resfriamento de usinas termoelétricas a carvão, gás ou nucleares. Estes efluentes diferenciam-se significativamente nos constituintes, na temperatura, salinidade e também na vazão lançada exigindo assim diferentes características de tratamento e lançamento.

Uma forma de minimizar os impactos decorrentes da poluição dos cursos d'água no que diz respeito à preservação do meio ambiente e à melhoria das condições de saúde pública é a utilização de sistemas de esgotamento de efluentes domésticos e industriais, que consistem de estações de tratamento de esgotos e a disposição final dos mesmos. A disposição dos efluentes domésticos, industriais, entre outros, por emissários submarinos ou subfluviais, apresenta elevada capacidade de dispersão e depuração da matéria orgânica, desde que o ambiente receptor apresente dimensões suficientemente grandes e com boas características de transporte residual (*flushing*) e também suficientemente dinâmico para servir como sistema de autodepuração. Combinações entre diferentes configurações de sistemas de esgotamento de efluentes permitem o tratamento de pequenas ou grandes vazões, necessitando de espaços físicos diferentes para atingir níveis requeridos de tratamen-

to/diluição considerando os custos de implantação e operação, e as despesas com manutenção. No caso de esgoto doméstico, estas configurações podem apresentar um tratamento primário com emissário longo lançado em um ambiente aberto e grande ou um tratamento secundário/terciário com emissário curto lançado em um ambiente menor ou mais sensível, também com diferenças no projeto dos difusores. No caso de lançamentos de águas de resfriamento muitas vezes são utilizados canais abertos na costa, aqui chamados emissários a superfície livre. A definição destas configurações, por envolver diversos parâmetros, usualmente é realizada com o auxílio do uso de modelos computacionais.

Os emissários também são utilizados para realizar a disposição final de plantas de dessalinização e águas de resfriamento em corpos d'água receptores. Este tipo de uso tem se intensificado ao longo dos anos devido à necessidade de obtenção de um maior volume de água potável *versus* a diminuição das fontes de água doce, levando a implantação de usinas de dessalinização; e à necessidade do aumento de fornecimento de energia elétrica e consequentemente o aumento do uso de usinas termelétricas e nucleares que utilizam água de resfriamento no seu processo. Os volumes de água de resfriamento/refrigeração são geralmente altos (ordem de 10 a 100 m³/s), configurando assim ordens de grandeza maiores do que os volumes de estações de tratamento de esgotos.

A capacidade de dispersão da temperatura, salinidade, matéria orgânica ou outras substâncias e poluentes nos oceanos e rios reside na possibilidade de transporte residual para locais mais abertos ou a jusante do lançamento, assim como da turbulência natural ou gerada pela interação entre o lançamento e corpo receptor. Ou seja, a diluição dos compostos supracitados depende das alterações hidrodinâmicas do corpo receptor causadas pelos lançamentos realizados via emissários. Reside também, no caso de efluentes domésticos lançados em áreas costeiras ou estuários, na disponibilidade características que propiciam a estabilização da matéria orgânica e por se apresentar como ambiente hostil à sobrevivência de microrganismos.

Mesmo o ambiente marinho apresentando estas características, o lançamento de efluentes via emissários submarinos gera impactos ambientais, que podem ser positivos, no caso de lançamento de nutrientes em áreas pobres ou sem nutrientes, ou negativos, no caso de lançamento de substâncias que podem prejudicar os organismos. Desta forma, é importante conhecer e analisar a interação hidrodinâmica e o destino dos efluentes lançados sob a influência de corpos receptores com diferentes campos de velocidades, densidades e outros

processos, pois dependendo da interação entre o lançamento e o escoamento ambiente nos diferentes tipos de aplicação dos emissários (esgotos domésticos, industriais, água de resfriamento ou de dessalinização) complexidades e uma grande variedade de processos físicos podem ocorrer (JIRKA, 2004).

Os lançamentos via emissários são escoamentos chamados de jatos com flutuabilidade (positiva ou negativa) ou jatos turbulentos sendo estes movimentos no fluido gerados por uma injeção contínua, que possui tanto quantidade de movimento como flutuabilidade, em um corpo receptor através de um bocal (FISCHER *et al.*, 1979; JIRKA, 2004). Recebem este nome por serem a combinação de jatos com plumas. Segundo Fischer *et al.* (1979), jatos são descargas de um fluido por um orifício ou bocal em um grande corpo receptor de mesmo ou fluido similar, enquanto que as plumas são escoamentos semelhantes aos jatos, porém geradas pela energia potencial da fonte que fornece flutuabilidade positiva ou negativa ao fluido lançado com relação ao fluido do escoamento ambiente. O comportamento dos jatos com flutuabilidade sob a influência de processos importantes como as correntes ambientais, densidades, espalhamento e recirculação tem sido simulado por modelos computacionais por décadas (ROBERTS; VILLEGAS; MORELISSEN, 2015).

Os processos que governam a dinâmica destes jatos com flutuabilidade ocorrem em escalas temporais e espaciais significativamente diferentes, sendo caracterizadas e classificadas em 3 (três) zonas definidas ao longo da trajetória da pluma: campo próximo, zona intermediária e campo afastado.

O campo próximo é a região onde o fluxo de quantidade de movimento e de flutuabilidade do efluente dominam o comportamento da pluma. No campo afastado o comportamento (trajetória e diluição) da pluma é dominado pelos processos de espalhamento lateral, difusão passiva e a advecção pelas correntes ambientais, geralmente não-permanentes. A zona intermediária é a região de transição entre os processos que ocorrem no campo próximo e no campo afastado.

Existem sistemas computacionais que conseguem simular os processos que ocorrem em toda a escala temporal e espacial que determinam o comportamento dos jatos com flutuabilidade/pluma dentro do ambiente (modelos não hidrostáticos) como o ANSYS Fluent e o FLOW3D CFD. Entretanto, estes demandam muito tempo computacional tornando-os ainda não factíveis para a grande maioria das aplicações (MORELISSEN; VAN DER KAAIJ;

BLENINGER, 2013), sendo necessário mais de um modelo para simular a trajetória completa dos jatos flutuantes/pluma provenientes de emissários.

No desenvolvimento desta tese são utilizados o modelo Delft3D-FLOW para as simulações do campo afastado e o CORMIX para as simulações do campo próximo.

O CORMIX, *Cornell Mixing Zone Expert System* (JIRKA *et al.*, 1996) é um sistema especialista que congrega várias rotinas para analisar a geometria da pluma e a diluição no campo próximo e intermediário. O modelo Delft3D-FLOW (DELTARES, 2011) simula fluxos hidrodinâmicos em três dimensões gerados por maré, vento e diferenças de densidade induzidas pela salinidade e/ou temperatura e também permite a introdução de fontes de poluição não-permanentes para a simulação de lançamentos.

Desta forma, apesar de existirem vários modelos que simulam os processos de campo próximo (FISCHER *et al.*, 1979; JIRKA, 2004, 2006; MUELLENHOFF *et al.*, 1985; ROBERTS, , 1999b) e de campo afastado (BLUMBERG; MELLOR, 1987; HORITA; ROSMAN, 2004; ROBERTS, 1999a) e também a existência de diferentes formas de acoplamentos entre estes modelos (BLENINGER, 2006; BOTELHO *et al.*, 2011, 2016; CHOI; LEE, 2007; FEITOSA, 2007; ZHANG; ADAMS, 1999), nenhum deles apresenta critérios para estabelecer qual o tipo de acoplamento deve ser realizado. Desta forma, podem-se gerar resultados super ou subestimados, o que pode induzir ações errôneas relacionadas por exemplo, a avaliação de impactos ambientais, assim como também se pode ter um tempo computacional maior do que o necessário.

1.2 QUESTÕES E HIPÓTESES

Diante do exposto, esta tese é norteada pelas seguintes perguntas de pesquisa: (a) Quais são os efeitos e as consequências dos diferentes métodos de acoplamento sobre a hidrodinâmica; (b) Como definir o tipo de acoplamento baseado no tipo de lançamento/situação ambiental; (c) Quais são as situações, em que momentos e onde o acoplamento deve ser estabelecido; e (d) Quais são os efeitos e as consequências dos diferentes métodos de acoplamento sobre a dispersão dos efluentes. As hipóteses do trabalho consideram que o acoplamento dinâmico apresenta efeito significativo na hidrodinâmica ambiente sob influência de lançamentos realizados via emissários submarinos ou subfluviais, e que estas alterações hidrodinâmicas apresentam efeito significativo na dispersão dos efluentes.

O acoplamento dinâmico do Delft3D-FLOW com o CORMIX combina os benefícios e a eficiência de ambos modelos, resultando em um esquema acoplado mais acurado que auxilia na compreensão dos processos envolvidos no lançamento de efluentes por emissários, permitindo aperfeiçoar o gerenciamento e controle de qualidade das águas costeiras sujeitas à poluição por despejos de esgotos, como observado em Horita e Carvalho (1999), Schmeling e Horita (2012), escoamentos de drenagem urbana (FRACALLOSSI; KUROSHIMA; HORITA, 2012), dragagens, águas de resfriamento ou aquecimento de indústrias ou produtores de energia.

Dentro desta perspectiva, a contribuição desta tese foi a implementação e análise de diferentes tipos de acoplamento (nulo, passivo e dinâmico) visando a compreensão dos processos hidrodinâmicos e de mistura que ocorrem na interação entre o jato/pluma e o escoamento ambiente, assim como o estabelecimento de critérios, baseados em escalas características, que indiquem qual o acoplamento mais apropriado a ser utilizado.

1.3 OBJETIVOS

De modo a responder as perguntas de pesquisa, propõem-se os seguintes objetivos.

GERAL

Acoplar dinamicamente modelos hidrodinâmicos tridimensionais do campo próximo com o campo afastado de lançamentos de efluentes via emissários submarinos ou subfluviais.

ESPECÍFICOS

- Implementar os diferentes métodos de acoplamento (nulo, passivo e dinâmico) nos sistemas computacionais;
- Aplicar os diferentes métodos de acoplamento a um domínio genérico simplificado em casos de regime permanente e regime não permanente;
- Analisar as alterações hidrodinâmicas no campo afastado gerado pela hidrodinâmica do campo próximo sob a ótica dos diferentes tipos de acoplamento;
- Definir critérios que indiquem o tipo de acoplamento apropriado baseado na análise de escalas características;
- Determinar a distribuição de concentrações de um traçador conservativo pelas abordagens Euleriana e Lagrangeana;

- Analisar as alterações nas concentrações de um traçador conservativo induzidas pelas alterações hidrodinâmicas sob a ótica dos diferentes tipos de acoplamento.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente documento encontra-se estruturado com o Capítulo 2 apresentando a fundamentação teórica a respeito dos tópicos fundamentais para o desenvolvimento desta tese, assim como o estado da arte sobre as formas de acoplamento entre modelos numéricos para o campo próximo e o campo afastado de lançamentos realizados por meio de emissários submersos.

Na sequência, no Capítulo 3 referente aos Modelos e Métodos, apresenta-se uma descrição do CORMIX e o Delft3D-FLOW, modelos utilizados para simular os processos no campo próximo e campo afastado, respectivamente. Apresenta-se também os métodos de implementação dos acoplamentos dos modelos numéricos, a descrição do domínio utilizado nas simulações numéricas, assim como a definição dos casos testes. Ainda neste capítulo apresenta-se o método aplicado para avaliar qualitativa e quantitativamente as alterações hidrodinâmicas geradas pelo campo próximo no campo afastado e também os critérios, baseados em escalas características, avaliados para verificar o acoplamento mais apropriado a ser utilizado. Este capítulo finaliza com a apresentação dos métodos utilizados na análise da dispersão do lançamento com a abordagem Euleriana e Lagrangeana.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados referentes a aplicação dos diferentes tipos de acoplamento ao domínio com a imposição das características dos casos testes em regime permanente e não permanente, a análise e definição das escalas características e a análise da dispersão dos efluentes, assim como a discussão destes resultados.

A tese é finalizada com a apresentação das conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Nos apêndices são apresentadas as descrições dos modelos integrais utilizados para representar os processos no campo próximo (Apêndice A) e de alguns modelos mais utilizados para simular os processos de campo afastado (Apêndice B), assim como são apresentadas as formulações matemáticas dos modelos utilizados nesta tese, CorJet (Apêndice C) e Delft3D-FLOW (Apêndice D). Ainda neste item é apresentado um exemplo do arquivo de entrada CORINP.dat (Apêndice E), utilizado no algoritmo do acoplamento dinâmico, e figuras

contendo as velocidades induzidas obtidas com o acoplamento dinâmico e passivo para cada caso teste (Apêndice F).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados conceitos e definições fundamentais para o embasamento teórico deste trabalho, assim como a revisão da literatura de assuntos correlatos ao desenvolvido nesta tese.

2.1 EMISSÁRIOS

Emissários submarinos ou subfluviais são sistemas que consistem basicamente de uma tubulação (ou canal aberto no caso de lançamentos na margem), proveniente da estação de tratamento terrestre e que transporta o efluente até o local de lançamento no corpo d'água receptor através de difusores (Figura 1). A posição do lançamento, o comprimento desta tubulação e o desenho dos difusores depende do nível do tratamento prévio dado ao efluente em terra, e das características do corpo receptor (profundidade, correntes de grande escala ou de transporte residual e campos de velocidades no local de lançamento, densidades, turbulência, entre outros). Este é determinado pela ação conjunta das forçantes (maré, clima de ondas, regime de ventos, vazão). Devido a esta configuração, os emissários proporcionam um lançamento de efluentes em locais menos sensíveis do ponto de vista ecológico e com menos possibilidade de contato com seres humanos.

Os emissários submarinos ou subfluviais podem ser usados para a disposição final de efluentes domésticos, efluentes industriais, águas de resfriamento ou águas de dessalinização e têm como objetivo principal obter uma rápida mistura inicial do efluente com a água do corpo receptor, facilitando assim a decomposição deste através do uso de processos naturais de diluição, dispersão e assimilação após um adequado condicionamento prévio em terra, visto a grande capacidade de depuração do oceano ou de grandes rios.

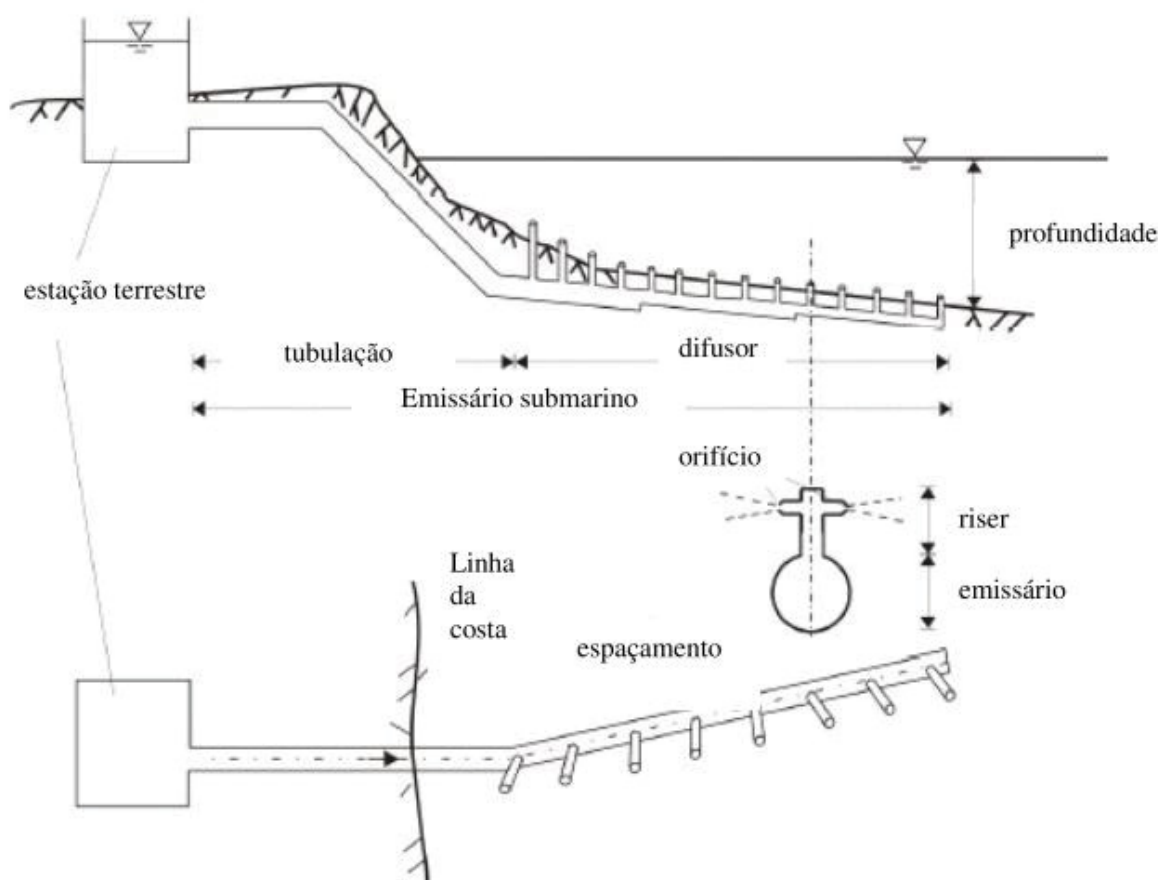


Figura 1 – Configuração de um emissário submarino ou subfluvial com sistema de difusores, vista em perfil e em planta.

Fonte: Bleninger, (2006).

De acordo com Carvalho; Roberts e Roldão (2002), os impactos ambientais gerados pela descarga de emissários submarinos para efluentes domésticos ficam restritos a áreas próximas aos difusores devido à alta capacidade de autodepuração dos oceanos, ocasionados pela mistura intensa que ocorre devido a grande diferença de quantidade de movimento e/ou flutuabilidade da descarga de efluentes e o corpo receptor, e pelo decaimento bacteriano. Estes processos são responsáveis por uma rápida redução na concentração dos organismos indicadores de contaminação fecal (coliformes fecais) em até ordens de 10^5 . Quando se trata de sedimentos de locais que recebem a descarga de emissários, verifica-se que o impacto gerado (alteração na granulometria, características químicas e ecotoxicológicas) também se localiza nas proximidades dos difusores, porém com o transporte de sedimentos a área afetada pode ser maior (ABESSA *et al.*, 2005).

Quando se trata do lançamento de efluentes industriais os impactos ambientais podem ser maiores pois, apesar do emissário promover uma mistura intensa entre efluente e

água do corpo receptor, estes podem ter composição variada, podendo ser constituído de substâncias de difícil degradação.

Os emissários são classificados de acordo com suas características físicas como a sua localização: descargas superficiais ou descargas submersas; suas características de mistura: difusor único ou vários difusores (multiorifícios); e a característica do efluente: flutuabilidade negativa ou positiva (BLENINGER, 2006). E apresentam dimensões que variam consideravelmente. No Brasil havia aproximadamente 30 emissários submarinos e subfluviais em 2012 lançando esgotos domésticos ou industriais (BAPTISTELLI, 2008), cujo comprimento varia de 150 a 7200 metros, o diâmetro de 0,35 a 2,40 metros e a vazão de 0,012 a 12,00 m³/s (BAPTISTELLI, 2008; TREVISAN; LAPA; MARCELLINO, 2009).

2.2 SISTEMA DE COORDENADAS E EQUAÇÕES GOVERNANTES

As equações que governam o escoamento 3D e os processos de mistura do efluente seguem os princípios de conservação da massa (equação da continuidade), da quantidade de movimento (equação de Navier-Stokes), e a equação de conservação de massa de solutos (transporte advectivo-difusivo). As equações apresentadas a seguir consideram a decomposição de Reynolds, onde as incógnitas são representadas pela soma do valor médio mais a flutuação turbulenta, sendo chamadas de equações de *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) e são apresentadas no formato de representação do Delft3D-FLOW, em coordenadas Cartesianas retangulares (Figura 2) (GERRITSEN *et al.*, 2007; LESSER *et al.*, 2004; ULLMANN, 2008). No Delft3D-FLOW a coordenada vertical pode ser representada pela coordenada z ou σ . No Apêndice D são apresentadas as equações de águas rasas em coordenadas curvilíneas.

A coordenada σ é definida como sendo:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}, \quad (1)$$

onde z = coordenada vertical (m); ζ = a elevação da superfície livre acima de um plano de referência ($z = 0$) (m); d = cota batimétrica do fundo (m); e H = profundidade total (m), dado por $d + \zeta$.

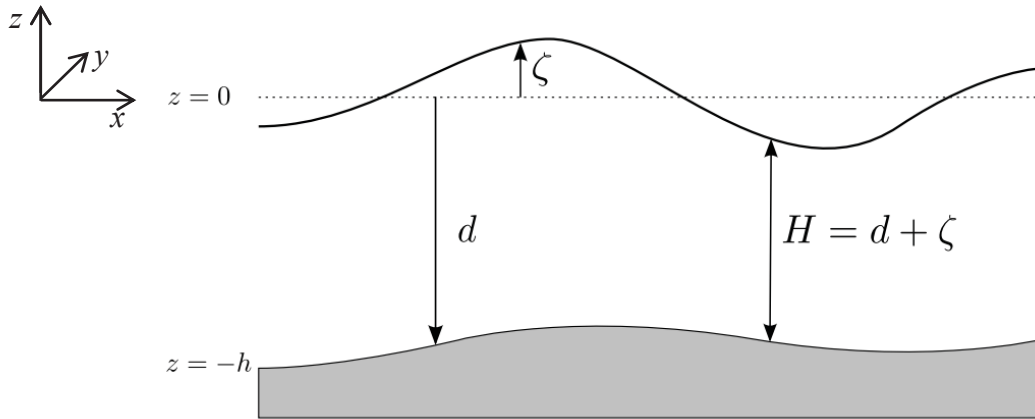


Figura 2 – Definição da elevação da superfície livre (ζ), cota batimétrica do fundo (d) e profundidade total (H).

Fonte: Deltares (2011).

Com este sistema, a grade é ajustada nesta direção tanto pelo fundo como pela superfície livre, desta forma o número de camadas verticais ao longo de todo o domínio horizontal é constante, independente da profundidade local, conforme se observa na Figura 3.

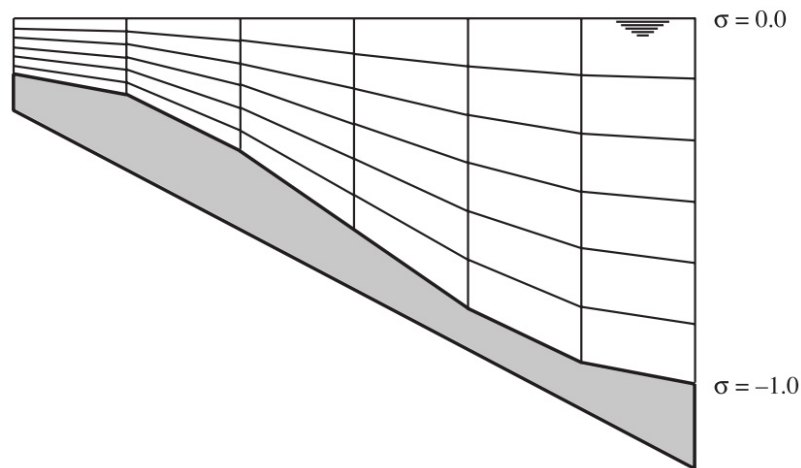


Figura 3 – Exemplo de discretização vertical usando a coordenada σ com 6 camadas de mesma espessura.

Fonte: Lesser *et al.* (2004).

Equação da Continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = Q_s, \quad (2)$$

onde u , v e w = componente de velocidade na direção x , y e z , respectivamente (m/s) e Q_s = fluxo da fonte/sumidouro por unidade de volume (1/s). Este último termo é acrescentado para representar o arraste ou o fluxo diluído no acoplamento dinâmico.

Equação da Quantidade de Movimento

As equações tridimensionais não hidrostáticas, com coordenadas cartesianas retangulares são descritas a seguir (KOWALIK; MURTY, 1995; ROSMAN, 1997):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f_V + M_u, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) - f_U + M_v, \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu_H \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\rho}{\rho_0} g, \quad (5)$$

onde f = parâmetro de Coriolis (frequência inercial) (s^{-1}); ρ = densidade da mistura (kg/m^3); ρ_0 = densidade de referência (kg/m^3); g = aceleração da gravidade (m/s^2); p = pressão ($kg/m.s^2$); ν_V, ν_H = viscosidade turbulenta vertical e horizontal, respectivamente (m^2/s) e M_u e M_v = contribuições devido a fontes/sumidouros externos de quantidade de movimento (m/s^2). Este último termo representa, por exemplo, lançamentos ou retiradas de água.

Equação do transporte advectivo-difusivo

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \lambda_d c + Q_c, \quad (6)$$

onde c = concentração da substância (kg/m^3); D_H, D_V = coeficiente de difusividade turbulenta na direção horizontal e vertical, respectivamente (m^2/s); λ_d = coeficiente de decaimento de primeira ordem (s^{-1}); Q_c = fluxo de massa da fonte/sumidouro de soluto ou traçador por unidade de volume ($kg/m^3.s$). Este termo é importante para o acoplamento pois permite a inclusão do fluxo de massa gerado no campo próximo no campo afastado.

Equação de estado

Para a resolução de escoamentos baroclínicos é necessário incluir uma equação de estado que relacione a densidade da mistura, ρ (kg/m^3), como função da salinidade (s) em unidades práticas de salinidade e temperatura (T) em $^{\circ}C$. A seguir apresenta-se a equação da Unesco (UNESCO, 1981) pelo fato da mesma ser a equação padrão no Delft3D-FLOW.

$$\rho = \rho_0 + As + Bs^{3/2} + Cs^2 \quad (7)$$

onde ρ_0 é a densidade da água (kg/m^3) sendo definida como:

$$\rho_0 = 999,842594 + 6,793952 \cdot 10^{-2} T - 9,095290 \cdot 10^{-3} T^2 + 1,001685 \cdot 10^{-4} T^3 - 1,120083 \cdot 10^{-6} T^4 + 6,536332 \cdot 10^{-9} T^5 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} A &= 8,24493 \cdot 10^{-1} - 4,0899 \cdot 10^{-3} T + 7,6438 \cdot 10^{-5} T^2 - 8,2467 \cdot 10^{-7} T^3 + 5,3875 \cdot 10^{-9} T^4 \\ B &= -5,72466 \cdot 10^{-3} + 1,0227 \cdot 10^{-4} T - 1,6546 \cdot 10^{-6} T^2 \\ C &= 4,8314 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad (9)$$

Para resolver estas equações é necessário prescrever valores para as viscosidades e difusividades turbulentas (ν_H, ν_D, D_H, D_V) de modo a se ter um problema matemático fechado (número de equações igual ao número de incógnitas). A prescrição de tais valores ocorre pela aplicação de modelos de turbulência, comumente chamados de modelos de fechamento da turbulência.

De acordo com Rodi (1993), define-se modelo da turbulência como sendo um conjunto de equações algébricas ou diferenciais que determinam os termos relacionados ao transporte turbulento nas equações do escoamento de grande escala como as equações de RANS apresentadas acima. Estes modelos não simulam os detalhes do escoamento turbulento mas os efeitos da turbulência nos escoamentos de grande escala, e para isso baseiam-se em hipóteses relacionadas aos processos turbulentos e necessitam da entrada de constantes ou funções empíricas.

Para a maioria das aplicações de interesse deste trabalho, nomeadamente, circulação hidrodinâmica e processos de lançamento de efluentes, estas equações não podem ser resolvidas analiticamente. Desta forma, são consideradas algumas simplificações, de modo a auxiliar na obtenção de uma solução aproximada (GERRITSEN *et al.*, 2007).

As simplificações referentes às escalas espaciais, temporais e imposição de condições de contorno serão apresentadas mais adiante na descrição dos modelos a serem utilizadas nesta tese (BLENINGER, 2006).

2.3 DESCRIÇÃO E MODELAGEM DOS PROCESSOS DE MISTURA

Os processos de mistura resultam da interação entre as condições hidrodinâmicas do corpo receptor e a configuração do emissário, podendo ser divididos em 3 (três) regiões distintas devido ao fato de que ocorrem em diferentes escalas temporais e espaciais.

2.3.1 Campo próximo

Próximo aos difusores, o grau de mistura e a trajetória do jato flutuante advém das características iniciais da quantidade de movimento e da flutuabilidade do jato (devido a

diferenças de densidade) e, da geometria dos difusores. Esta região é chamada de campo próximo (*near field*) ou zona de mistura ativa, pois a quantidade de movimento dos jatos pode alterar o escoamento do corpo receptor (LI; HODGINS, 2010). De modo geral, surgem acelerações verticais devido à combinação da velocidade de descarga do efluente e do fluxo de flutuabilidade decorrente da mistura turbulenta.

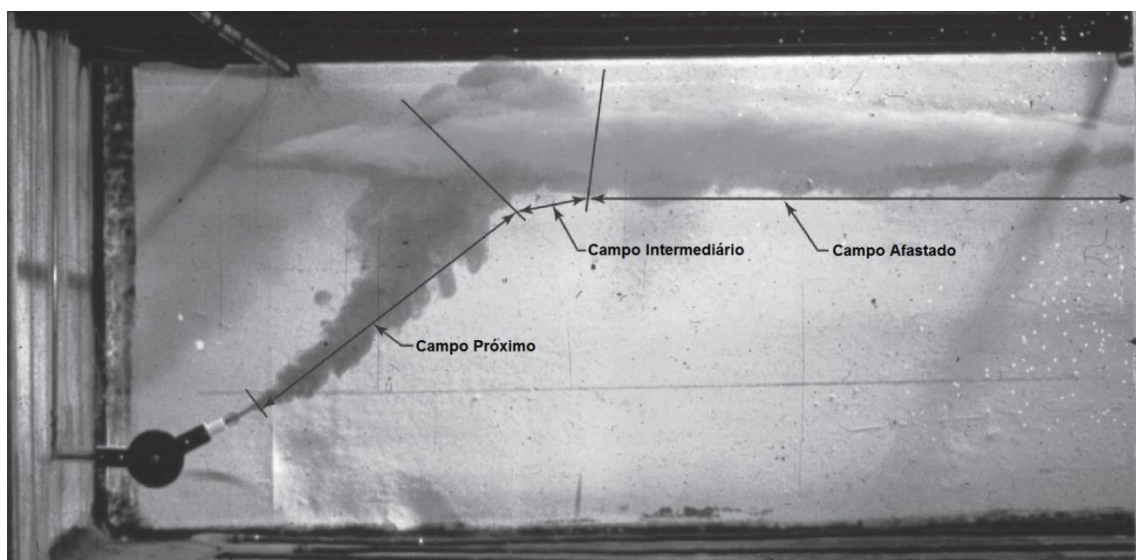


Figura 4 – Experimento laboratorial de um jato turbulento inclinado com flutuabilidade positiva em um reservatório estagnado, linearmente estratificado.

Fonte: Socolofsky; Bleninger; Doneker (2013) adaptado por Ishikawa (2013).

Os efluentes domésticos por serem compostos basicamente de água (99,9%), apresentam densidade próxima à água doce, e assim, muito menor do que a densidade da água do mar, causando desta forma flutuabilidade positiva. Os efluentes de água resfriamento também possuem flutuabilidade positiva, porém a diferença de densidade é causada pela diferença de temperatura entre o efluente (mais quente) e a água do mar (mais fria), o que gera uma diferença de densidade menor. Já os efluentes de plantas de dessalinização apresentam flutuabilidade negativa por apresentarem densidade maior que a da água do mar. A partir destas definições, salienta-se que o texto subsequente relata os processos decorrentes de jatos com flutuabilidade positiva. Os jatos provenientes de emissários submersos irão subir até uma profundidade onde encontram a superfície livre ou quando a diferença de densidade entre o efluente e o ambiente se torna desprezível (Figura 4). Neste trajeto, o efluente se mistura com a água do ambiente. A diferença entre a alta velocidade do jato e a velocidade do ambiente gera tensões de cisalhamento entre os dois fluidos (JIRKA *et al.*, 1996), ocasionando a formação de pequenos vórtices na interface, onde estes arrastam o

fluido do ambiente para dentro do efluente fazendo com que este se dilua rapidamente. Este processo é conhecido como arraste, intrusão, *entrainment*.

O campo de velocidades do ambiente deflete o jato de efluentes gradualmente na direção predominante (Figura 5) e, quando o corpo receptor apresenta estratificação térmica ou de salinidade, o jato fica aprisionado em uma determinada profundidade, fazendo com que as acelerações verticais fiquem próximas a zero, ou seja, a flutuabilidade deixa de ser um processo atuante. Este processo também ocorre quando o jato interage com a superfície livre. A partir deste ponto, a aproximação hidrostática pode ser assumida, caracterizando a transição com o campo intermediário.

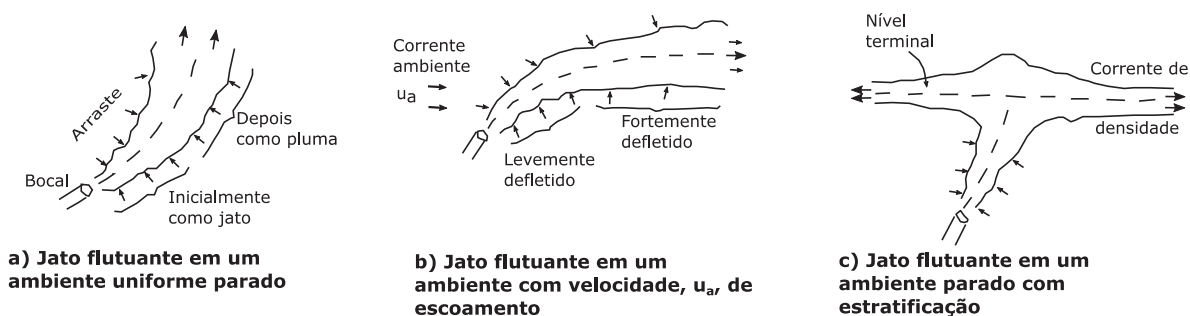


Figura 5 – Características das trajetórias dos jatos influenciados pela a) densidade ambiente; b) velocidade do escoamento (u_a); c) estratificação do ambiente.

Fonte: Jirka *et al.* (1996), modificado pelo autor (2015).

O comprimento do campo próximo (escala espacial) e a escala temporal dos processos de mistura envolvidos nesta região estão, respectivamente na ordem de 10 a 100 metros e na ordem de segundos a minutos (CHOI; LEE, 2007), sendo que a escala espacial usualmente é da ordem da escala da profundidade (Figura 6).

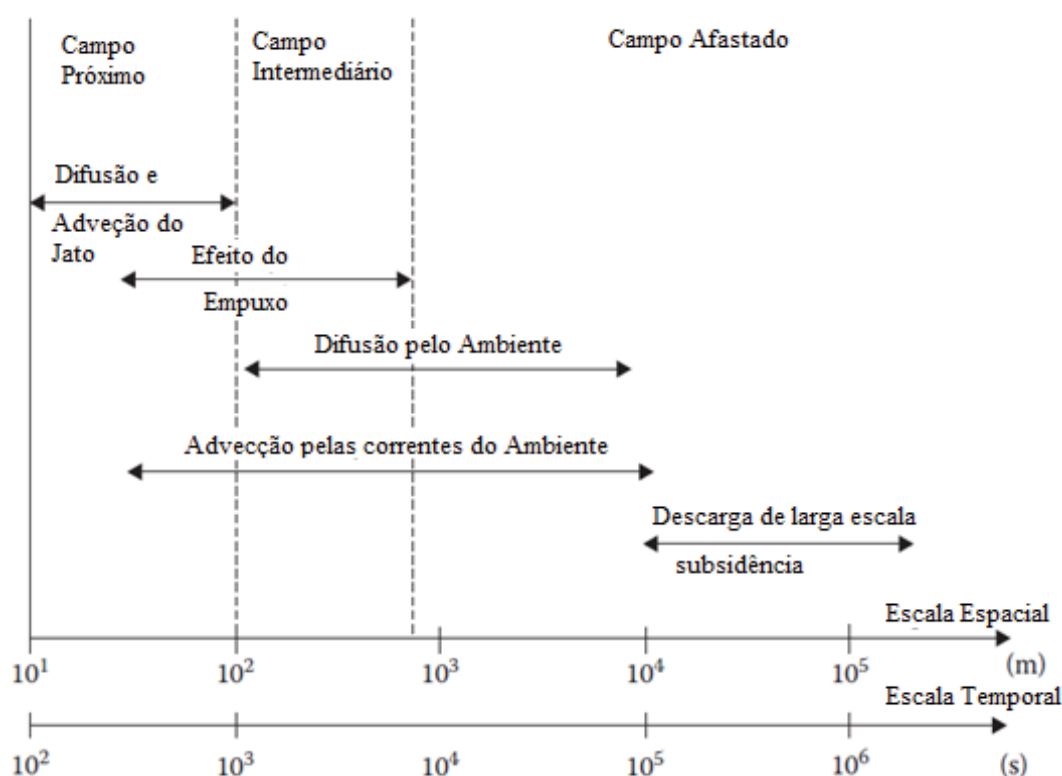


Figura 6 – Escalas temporais e espaciais típicas de processos de transporte e mistura, relacionadas à disposição final de efluentes no oceano.

Fonte: Socolofsky; Bleninger; Doneker (2013) adaptado por Ishikawa (2013).

2.3.1.1 Modelos de campo próximo

De acordo com os processos relacionados ao campo próximo apresentados no item 2.3.1, as equações (3), (4) e (5) podem ser simplificadas considerando-se os seguintes fatores:

- Os efeitos da rotação da Terra podem ser desconsiderados, pois as escalas dos processos atuantes nesta região não sofrem a influência da força de Coriolis;
- Podem ser escritos em regime de escoamento permanente, pois as mudanças no fluxo de entrada do emissário e no corpo receptor estão na ordem de vários minutos, enquanto que as mudanças no escoamento ambiental estão na ordem de horas. Assim, considera-se $\partial/\partial t = 0$.

Considerando as simplificações apresentadas, existem diversos modelos que foram desenvolvidos especialmente para simular os processos do campo próximo, sendo que estes podem ser classificados conforme o método adotado para a solução do sistema de equações governantes (BLENINGER, 2006):

- Métodos empíricos
- Métodos integrais

(c) Métodos numéricos

(a) Os modelos empíricos (ou aproximações de escalas características) são aplicáveis a geometrias e escoamentos simples, o que possibilita a solução destes problemas por meio de soluções analíticas, uma vez que são feitas simplificações nas equações diferenciais parciais. A ideia básica é usar análises adimensionais de modo a formar grupos que possam ser usados para criar relações entre experimentos laboratoriais e os processos que ocorrem na escala real (ZHAO *et al.*, 2011). Usualmente geram como resultado somente valores de diluição ao final do campo próximo.

Segundo Zhao *et al.* (2011), a vantagem dos modelos empíricos é que as equações são simples de ser resolvidas e usualmente incluem os principais efeitos físicos como as interações com os contornos, o que não é facilmente incluído nos modelos numéricos. Entretanto, este tipo de modelo apresenta as seguintes limitações: (i) resultados satisfatórios são obtidos somente para aplicações dentro da faixa de valores para a qual foram obtidas as equações empíricas; (ii) as expressões empíricas para diferentes regiões de uma mesma pluma podem não ser contínuas e a previsão nesta área de descontinuidade não terá boa aproximação para as regiões envolvidas simultaneamente; (iii) as condições no laboratório, para as quais as equações empíricas foram geradas, são limitadas e apresentam diferenças às condições na realidade; (iv) os resultados apresentam diluição final, posição vertical e geometria no final do campo próximo, mas não trajetórias ou algo similar; e (v) consideram situações estáveis, ambientes profundos com lançamentos pequenos e sem interação com o contorno.

Como exemplo deste tipo de modelo pode-se citar o NRFIELD. O modelo NRFIELD é uma versão modificada do modelo RSB - Roberts-Snyder-Baumgartner (ROBERTS *et al.* 1989a, b, c) que foi desenvolvido para jatos multiorifícios baseado em experimentos realizados em ambientes estratificados, onde quatro relações adimensionais dependentes podem ser expressas como funções de quatro valores independentes como se segue:

$$\frac{S_m q N}{b^{2/3}}, \frac{z_e}{l_b}, \frac{h_e}{l_b}, \frac{z_m}{l_b} = f\left(\frac{l_m}{l_b}, \frac{s}{l_b}, F_a, \Theta\right) \quad (10)$$

onde S_m é a diluição mínima no ponto de máxima concentração na pluma, $S_m = S/1.15$; S é a diluição média, $S = Q/Q_0$; Q é a vazão volumétrica taxa de descarga total no difusor ($L^3 t^{-1}$); N é a frequência de Brünt-Vaisalla (t^{-1}); q é a descarga por unidade de comprimento do difusor ($L^2 t^{-1}$); z_e é a altura até o topo da camada do efluente (L); s é o espaça-

mento entre os orifícios (L); h_e é a largura da camada do efluente após o aprisionamento (L); z_m é a altura acima da descarga até o ponto de diluição mínima (L); $F_a = u_a^2 / b$ é conhecido como F_a de Roberts ou Froude do ambiente, que expressa o efeito dinâmico das correntes similar ao número de Froude, u_a é a velocidade das correntes ($L t^{-1}$), b é o fluxo de flutuabilidade por unidade de comprimento do difusor e igual a $g(\Delta\rho/\rho_a)q$, onde $\Delta\rho$ é a diferença entre a densidade do efluente e do ambiente; Θ é o ângulo entre as correntes e o difusor (ROBERTS, 1989; ZHAO *et al.*, 2011).

Os experimentos em que o NRFIELD foi baseado abrangem uma larga faixa de parâmetros típicos de emissários submarinos, incluindo a quantidade de movimento do jato, fluxo de flutuabilidade, espaçamento entre os difusores, estratificação, velocidade e direção das correntes (ROBERTS, 1999b). Ele é restrito para a modelagem do campo próximo e não fornece informações sobre a trajetória da pluma e os contornos não são incluídos.

(b) Os métodos integrais baseiam-se na conservação da massa, quantidade de movimento, flutuabilidade e concentração. As distribuições de velocidade, temperatura e flutuabilidade são consideradas como distribuições Gaussianas, e as equações diferenciais parciais governantes são integradas ao longo da seção transversal da pluma para se obter equações diferenciais ordinárias. Estas descrevem a variação axial da largura da pluma, velocidade e diferença de densidade (KIM *et al.*, 2002). Geralmente geram como resultados valores de diluições e trajetórias da pluma. Zhao *et al.* (2011) afirmam que os resultados de modelos integrais apresentam boa concordância com dados experimentais de laboratório, assim como, conseguem prever corretamente o comportamento assintótico dos jatos e plumas. Entretanto, este tipo de modelo apresenta restrições espaciais relacionados a interações com contornos, pois foi desenvolvido para simular descargas em corpos d'água infinitos. Esta é a principal limitação de todos os modelos de métodos integrais.

Por ser o tipo de modelo padrão na simulação dos processos de campo próximo, existem mais exemplos disponíveis, como: DKHM, UM3, Jetlag, CorJet e MOHIDJET. O desenvolvimento destes modelos se diferem (i) no grau de considerações simplificadoras nas características do ambiente e/ou da descarga, e (ii) no tipo de fechamento que é feito para especificar o aumento do jato devido à turbulência e no comportamento do arraste gerado pelos jatos sob diferentes condições das forçantes. Uma descrição mais detalhada destes modelos encontra-se no Apêndice A.

Os modelos UM3, DKHM e NRFIELD, juntamente com outros modelos não citados neste trabalho fazem parte do sistema *Visual Plumes* (FRICK, *et al.*, 2003).

Carvalho *et al.* (2002) realizaram experimentos com traçadores fluorescentes para avaliar a diluição dos efluentes provenientes do Emissário Submarino de Esgotos de Ipanema (ESEI), Rio de Janeiro, comparando-os com os resultados obtidos pelos modelos UM3, NRFIELD e CORMIX. Concluindo que estes modelos conseguiram reproduzir razoavelmente as características da pluma como diluição do campo próximo, altura ao nível de menor diluição e espessura da pluma, porém nenhum deles conseguiu prever o comportamento não homogêneo da pluma (*patchy*).

Todos os modelos citados acima, com exceção do MOHIDJET, foram validados por meio da comparação com dados experimentais para diferentes condições, sendo considerados ferramentas úteis na análise do campo próximo de jatos (FRICK, *et al.*, 2003; JIRKA *et al.*, 1996; JIRKA, 2004, 2006, 2007; LEE; CHEUNG, 1990; MUELLENHOFF *et al.*, 1985; ROBERTS *et al.*, 1989a, b, d) quando não há interação com contornos (superfície, fundo ou camada de estratificação interna). O MOHIDJET foi validado comparando-se seus resultados com os obtidos pelos modelos CORJET e o JETLAG (LEITÃO *et al.*, 2004).

(c) Os métodos numéricos são utilizados quando a geometria do domínio modelado e o escoamento não permitem simplificações significativas, pois são complexos. Eles resolvem numericamente as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e transporte advectivo-difusivo em uma grade pré-definida (pontos de discretização do domínio da modelagem), calculando todas as características do escoamento em todos os pontos dessa grade. Desta forma, necessitam resolver o jato inteiro de velocidade induzida e sua interação com o escoamento ambiente, acoplando dinamicamente o modelo hidrodinâmico com a equação de transporte devido aos fortes efeitos da flutuabilidade. Resultando em modelos que exigem muito esforço computacional, o que limita suas aplicações.

Pode-se citar o FLUENT (ANSYS FLUENT CFD) como exemplo deste tipo de modelo. O FLUENT utiliza o método dos Volumes Finitos para resolver numericamente os processos governantes do escoamento do fluido, integrando as equações diferenciais parciais em um dado volume de controle. Também permite simular a mistura e transporte de espécies químicas resolvendo as equações de conservação descrevendo os fenômenos de convecção, difusão e reação química para cada espécie introduzida no processo. Este modelo apresenta uma série aplicações possíveis dentro da área de Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC).

Em uma aplicação do modelo FLUENT, Fortis (2005) simulou a descarga dos emissários submarinos do TEBAR – Petrobrás, validando os resultados pela comparação com experimentos feitos com traçadores fluorescentes. Neste trabalho também foi utilizado o CORMIX para avaliação da dispersão dos efluentes. Os resultados do FLUENT apresentaram dispersões na mesma ordem de grandeza da dispersão obtida com os traçadores, enquanto o CORMIX forneceu resultados mais conservadores de diluição. Apesar de ter apresentado resultados satisfatórios, o tempo computacional da execução do FLUENT é alto, onde 17000 s (4h40min) acarretaram em 7 dias de tempo computacional ininterruptos. O que torna inviável sua aplicação a problemas cujas forçantes apresentem variação numa escala temporal maior, como as marés.

2.3.2 Campo intermediário

O campo intermediário (*intermediate field*) é caracterizado pela transição entre os movimentos verticais decorrentes dos processos dominantes no campo próximo e o espalhamento horizontal do jato, sendo classificado de acordo a três principais processos: (a) a interação com o contorno, que inibe movimentos verticais; (b) o espalhamento horizontal devido a flutuabilidade também chamado de correntes de densidade; e (c) a instabilidade do campo próximo (BLENINGER, 2006). Esta transição ocorre a uma profundidade onde o jato se aproxima de um equilíbrio hidrostático, e esta profundidade pode ser um dos contornos físicos do corpo receptor (fundo para efluentes com flutuabilidade negativa ou superfície livre para efluentes com flutuabilidade positiva) ou uma profundidade intermediária, dependendo da diferença de densidade entre o efluente e o escoamento ambiente, conforme se pode observar na Figura 4. A partir deste momento o efluente passa a se comportar como uma pluma.

Tanto o item (a) e (b) apresentados acima estão relacionados com a interação com os contornos, sendo que as implicações são especialmente grandes e importantes quando a velocidade ambiente é pequena (AKAR; JIRKA, 1995; BLENINGER, 2006). Outros tipos de interação com o contorno são apresentados em Bleninger (2006). As correntes ambientais fracas fazem com que as plumas provenientes do emissário sejam pouco defletidas e assim se apresentem aproximadamente verticais, sofrendo choque com a superfície (*surface impingement*) ou apresentando comportamento oscilatório na altura do equilíbrio hidrostático. Em ambos os casos, as plumas sofrerão um rápido espalhamento horizontal em todas as

direções, conforme se mostra na Figura 7. Nesta figura é possível notar que após o choque com a superfície ocorrem dois fenômenos: (1) o espalhamento horizontal a montante, causado pelo espalhamento aproximadamente radial que ocasiona movimentos em todas as direções, inclusive no sentido contrário do escoamento ambiente até o instante em que a velocidade das correntes ambientes se tornam preponderantes; (2) o espalhamento horizontal lateral, causado pelo mesmo processo porém, gerado pela pluma que é espalhada lateralmente e depois sofre advecção pelo escoamento ambiente (AKAR; JIRKA, 1994).

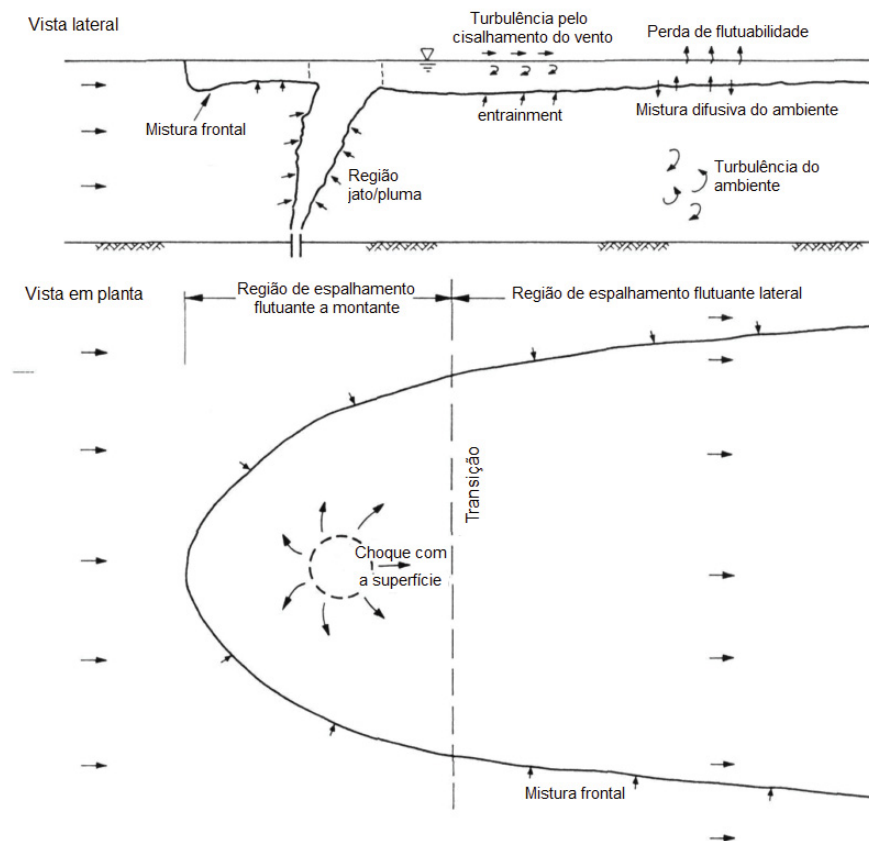


Figura 7 – Processos de espalhamento horizontal (espalhamento à montante e lateral) após a região do campo próximo. Vista lateral e em planta de um lançamento de um efluente com flutuabilidade positiva em um ambiente com pequena velocidade ambiente.

Fonte: Akar e Jirka (1994), adaptado pelo autor (2015).

Quando os movimentos induzidos pelos jatos alteram consideravelmente o escoamento ambiente no campo próximo é dito que este apresenta instabilidade, como grandes zonas de recirculação onde o processo de arraste ocorre dentro da própria pluma. Jirka; Harleman (1979) apud Jirka (2006), Jirka (1982) apud Jirka (2006), Jirka; Akar (1991) definiu a ocorrência de instabilidade no campo próximo a partir da expressão (11).

$$\frac{l_M}{H} (1 + \cos^2 \theta_0)^2 + \frac{l_M}{l_m} \sin \gamma_0 - 0,1 \frac{h_0 + l}{l_m} \sin \gamma_0 > 0,54 \quad (11)$$

onde θ_0 é o ângulo vertical da descarga, γ_0 é o ângulo de alinhamento da linha de difusores com a direção da corrente ambiente, h_0 é a altura da descarga com relação ao leito do ambiente e l é o espaçamento médio entre os difusores.

O critério de estabilidade relaciona processos que induzem instabilidades (1° e 2° termos) com processos estabilizadores (3° termo). O primeiro termo refere-se as instabilidades induzidas pelo fluxo de quantidade de movimento em corpo d'água de pequenas profundidades, enquanto o segundo termo refere-se as instabilidades induzidas pela velocidade do ambiente e poderia ser escrito como F_a^2 , já o terceiro termo corresponde aos efeitos estabilizadores do projeto do difusor que permite a passagem do escoamento ambiente (JIRKA, 2006).

Os processos de mistura do campo intermediário podem gerar modificações na concentração do ambiente, no espalhamento gravitacional e na estratificação do corpo receptor (CHOI; LEE, 2007), sendo importantes em ambientes rasos e/ou pouco dinâmicos, onde ocorrem fortes processos de espalhamento ou instabilidades. O espalhamento ocorre na horizontal pelas correntes de densidade. Em ambientes sob influência de campos de corrente com alta turbulência, os efeitos do campo intermediário são desprezíveis (BLENINGER, 2006).

Akar e Jirka (1994) apresentam critérios para avaliar a ocorrência de movimentos de espalhamento horizontal baseado em números adimensionais e escalas características para um lançamento estável em corpos d'água uniformes e em corpos d'água estratificados.

2.3.2.1 Modelos de campo intermediário

Para a simulação dos processos de campo intermediário, Koh (1983) desenvolveu um modelo para acoplar o processo de subida da pluma ao processo de espalhamento horizontal da mesma. As soluções explícitas deste modelo foram desenvolvidas para casos de plumas puras (fluxo de flutuabilidade é dominante) lançadas em ambientes uniformes ou linearmente estratificados.

Akar e Jirka desenvolveram um modelo que simula os dois processos que ocorrem após o choque da pluma com a superfície descritos acima, o espalhamento horizontal lateral e à montante. Este modelo inclui as acelerações convectivas da parte da frente da pluma, considerando as misturas geradas pelo processo de espalhamento; o processo de *entrainment* causado pela diferença de velocidades entre a pluma e o escoamento ambiente,

assim como o gerado pelo atrito do vento na superfície livre (AKAR; JIRKA, 1994, 1995). Este modelo foi incorporado ao CORMIX e desta forma consegue realizar simulações que englobam os processos de campo próximo, campo intermediário, quando estes forem importantes e o início do campo afastado.

2.3.3 Campo afastado

O campo afastado (*far field*) ou região de mistura passiva, ocorre após o estabelecimento da pluma e é caracterizado pelo transporte advectivo e difusivo, influenciados diretamente pelas condições ambientais. Nesta região, o transporte é independente das condições iniciais do lançamento. Desta forma, as condições existentes no corpo receptor, campo de velocidades e grau de turbulência, passam a determinar a trajetória e a diluição da pluma, fazendo com que estes processos sejam os principais responsáveis pela mistura. O campo de velocidades é função da variação dos forçantes de longo termo: maré, correntes de grande escala, vento, gradientes de pressão devido a gradientes na superfície livre (barotrópico) ou gradientes de densidade (baroclínico), e o efeito de rotação da Terra (força de Coriolis).

A escala temporal e espacial desta região apresenta-se na ordem de horas e quilômetros, respectivamente, conforme se observa na Figura 6.

Devido a grande diferença nas escalas temporais e espaciais dos processos de mistura do campo próximo e campo afastado, usualmente estes são descritos e modelados separadamente. A seguir descrevem-se alguns modelos utilizados para simular os processos no campo afastado.

2.3.3.1 Modelos de campo afastado

Diferentemente dos modelos de campo próximo, que focam os processos relacionados aos jatos com flutuabilidade, plumas, e sua interferência no corpo receptor, os modelos de campo afastado devem caracterizar o campo de velocidades ambiente e a turbulência do meio. Pois, após o estabelecimento da pluma na superfície livre ou presa pela estratificação de densidade, são estes os movimentos responsáveis pelo transporte e dispersão da mesma.

Considerando-se estas características do campo afastado, as equações (3), (4) e (5) podem ser simplificadas devido aos seguintes fatores:

- A aproximação hidrostática é válida, pois as profundidades do corpo receptor são bem menores do que a escala horizontal característica. Assim, as acelerações ver-

ticais são dominadas pela aceleração da gravidade, e as demais acelerações são desprezadas, reduzindo consideravelmente a componente vertical das equações governantes permanecendo apenas o termo $\partial p / \partial z = -\rho g$;

- Se o corpo receptor for verticalmente homogêneo (sem estratificação) pode-se reduzir a dimensionalidade do problema para um problema bidimensional;
- Pode-se desprezar a influência das tensões laterais de cisalhamento, sendo considerada apenas a tensão de cisalhamento no fundo.

Para a modelagem do campo afastado é necessário interligar um modelo hidrodinâmico a um modelo de transporte advectivo-difusivo, onde esta interligação pode ocorrer via acoplamento dos modelos ou por meio da aplicação dos resultados do modelo hidrodinâmico como entrada para o modelo de dispersão. Esta modelagem também pode ser realizada sob outro enfoque, baseado em um modelo estatístico de curto termo, o FRFIELD (ROBERTS, 1999). Este modelo insere a complexidade do escoamento do corpo receptor na modelagem da pluma de forma automatizada, pois utiliza séries temporais de correntes e densidades medidas, além de características da descarga e do difusor, acoplados diretamente do NRFIELD. Pelo fato do modelo estimar a variabilidade espacial de algumas propriedades estatísticas da pluma como a frequência de visitação e de excedência, ele permite avaliar os impactos em diversos pontos do domínio (CARVALHO, 2003). Apesar de adotar uma abordagem mais simples para a resolução do campo afastado, o FRFIELD torna-se menos efetivo quando as séries temporais são restritas a poucos pontos.

Nos últimos anos, tem havido um grande interesse no desenvolvimento de modelos multidisciplinares para integrar escoamento, transporte de contaminantes, qualidade de água, ecologia e transporte de sedimentos em sistemas sofisticados. Como exemplos deste tipo de sistemas pode-se citar: Mike 3 (*DHI – Danish Hydraulics Institute*), Delft3D (*Deltares*), SisBaHiA (ROSMAN, PAULO C. C., 2001), ECOM-si (USGS, 2013). Além destes sistemas, também se pode citar o POM (*Princeton Ocean Model*, (BLUMBERG; MELLOR, 1987)) como exemplo de modelo hidrodinâmico. Uma descrição mais detalhada destes modelos encontra-se no Apêndice B.

Os modelos hidrodinâmicos, acima citados, resolvem problemas de velocidade variável em todo o domínio, sendo assim, desenvolvidos para um referencial euleriano. As equações de conservação de calor e salinidade precisam ser resolvidas em paralelo às equações

do movimento, uma vez que estes parâmetros alteram a densidade da água através de uma equação de estado.

Além dos modelos hidrodinâmicos, a simulação no campo afastado requer a utilização de um modelo de transporte desenvolvido em abordagem Euleriana ou Lagrangeana.

Descargas que modificam as condições hidrodinâmicas (substâncias ativas) no campo afastado devem ser resolvidas dentro de um modelo hidrodinâmico euleriano, e o transporte da substância é efetuada pela equação de advecção-difusão, que neste caso é acoplado à equação de quantidade de movimento pela equação de estado. Enquanto que descargas que não modificam a hidrodinâmica (substâncias passivas) no campo afastado, têm seu transporte efetuado pela equação de advecção-difusão gerado pelo campo de velocidades resultante. O transporte pode ser realizado na mesma grade utilizada para o modelo hidrodinâmico ou em uma grade mais adensada, onde se utiliza interpolações do campo de velocidade anteriormente determinado.

A abordagem Euleriana possibilita simulações por longos períodos de tempo, apresentando interações com o campo de velocidades em todo o domínio. Entretanto, nos modelos de transporte eulerianos podem apresentar uma difusão numérica excessiva devido às grades relativamente grosseiras utilizadas no modelo hidrodinâmico, e oscilações artificiais para problemas dominados pela advecção, resultando em valores maiores ou menores do que o esperado, ou valores negativos na vizinhança de fortes gradientes (BLENINGER, 2006; ZHAO *et al.*, 2011).

Na abordagem Lagrangeana, os modelos de transporte também são chamados de modelos de trajetória de partículas. Nestes, a equação de transporte advectivo-difusivo não é resolvida diretamente, mas pelo acompanhamento de partículas individuais que vão se deslocando no espaço e no tempo. Pelo uso deste método, as partículas individuais são advectadas pelo campo de velocidade (componente determinístico) e a difusão turbulenta é simulada por um deslocamento aleatório do centro de massa da partícula (componente aleatório). Este deslocamento deve ter o comprimento da escala de turbulência estimada (BLENINGER, 2006), que juntamente com a velocidade são obtidos do escoamento. Este comprimento é estimado baseado no modelo de turbulência utilizado na simulação da circulação hidrodinâmica.

A conversão da localização das partículas em concentração ($C(x, t)$) é feita relacionando-se o número de partículas (N_g) de massa m que se encontram dentro de um pequeno

volume (V_g), conforme a equação (12). A forma como a massa de cada partícula é distribuída pelas células adjacentes da grade é definida pela função de distribuição:

$$C(x, t) = m \frac{N_g}{V_g}. \quad (12)$$

O modelo de trajetória de partículas representa a descarga por uma determinada quantidade de partículas, não necessitando resolver numericamente a equação de transporte advectivo-difusivo. Portanto, a solução obtida é virtualmente livre de difusão numérica ou oscilações artificiais, apresentando menos erros numéricos. Como cada partícula pode ser marcada com suas próprias características, existe a possibilidade de simular descargas de diferentes fontes. E o fato da massa total da substância lançada no corpo receptor ser representada por parcelas discretas de massa (partículas), a conservação de massa é automaticamente satisfeita.

Este tipo de modelo apresenta algumas desvantagens, dentre as quais se destaca a dificuldade na representação das condições de contorno (ANDRADE, 2006). O campo de velocidades entra apenas como dado de entrada deste tipo de transporte. O cálculo das concentrações depende da densidade de partículas por célula da grade, que diminui com o afastamento da fonte. Assim, a qualidade do campo de concentrações pode ser afetada. Os modelos lagrangeanos são mais efetivos para resolução de problemas onde altos gradientes de concentração estão envolvidos, como locais próximos à descarga e também quando a área de influência do lançamento fica restrita a uma pequena região quando comparada ao domínio da modelagem.

Apesar dos métodos lagrangeanos não apresentarem a necessidade de obedecer a um critério de estabilidade como nos métodos eulerianos, a resolução da grade e o tamanho do passo de tempo devem ser escolhidos criteriosamente de modo a manter a acurácia dos esquemas de advecção utilizados para o cálculo do movimento das partículas.

Algoritmos lagrangeanos usualmente estão envolvidos tanto na formulação de modelos de campo próximo como nos de campo afastado.

2.4 FORMAS DE ACOPLAMENTO

De acordo com os processos descritos no item 2.3, verifica-se os mesmos ocorrem em escalas temporais e espaciais significativamente diferentes impossibilitando a modelagem do campo próximo e do campo afastado com somente um modelo, pois os modelos

desenvolvidos para o campo afastado podem não resolver adequadamente os efeitos da descarga no campo próximo e vice-versa. Assim, vários modelos foram desenvolvidos para simular os processos do campo próximo (FRICK, *et al.*, 2003; MUELLENHOFF *et al.*, 1985; ROBERTS, 1999) e outros para simular os processos do campo afastado (BOGLE *et al.*, 1993; HORITA; ROSMAN, 2004; ROBERTS, 1999; SANTOS, 1995), como apresentado nos itens Modelos de Campo Próximo e Modelos de Campo afastado.

A maioria dos modelos de campo próximo determina a trajetória do jato ou pluma e concentrações do efluente independentemente da resolução da grade (JIRKA *et al.*, 1996; LEE; CHEUNG, 1990; ROBERTS, 1999), enquanto a modelagem do campo afastado necessita de modelos de alta resolução para representar o campo de velocidades e a distribuição das concentrações em uma grade. Para representar globalmente os processos de dispersão de contaminantes provenientes de emissários submarinos, é necessário acoplar os modelos que simulam os campos próximo e afastado. Este acoplamento pode ser simulado de diferentes formas, apresentando diferentes denominações. Quando se utiliza somente o modelo de campo afastado inserindo-se os dados do lançamento, que usualmente é a carga ou fluxo de massa ($M = Q_0 \cdot C_0$ (massa/tempo)), mas também pode ser introduzida quantidade de movimento, diretamente na localização do emissário como termo fonte, o acoplamento é dito nulo; quando os resultados do modelo de campo próximo são inseridos como dados de entrada para o modelo de campo afastado (os modelos são executados separadamente) o acoplamento é dito passivo; e o acoplamento é considerado dinâmico quando, durante a simulação do modelo de campo afastado seus resultados são utilizados como dado de entrada para o modelo de campo próximo e os resultados deste modelo (alterações no escoamento ambiente) são considerados na execução do modelo de campo afastado. E estas transferências de resultados ocorrem em um passo de tempo suficientemente pequeno que possibilitem a consideração de mudanças no escoamento do corpo receptor.

2.4.1 Acoplamento nulo

O chamado acoplamento nulo é aquele em que ocorre a introdução da massa do contaminante no modelo de campo afastado distribuída em uma área que representa o campo próximo (BLUMBERG *et al.*, 1996; HORITA; ROSMAN, 2004; SANTOS, 1995; ZHANG; ADAMS, 1999), sem que haja a execução de um modelo de campo próximo. As dimensões desta área devem possibilitar o estabelecimento de uma pluma passiva em relação ao esco-

amento ambiente. Nesta forma de acoplamento são desconsiderados os processos do campo próximo, assim seus resultados podem ser válidos quando o campo próximo apresenta dimensões pequenas em comparação à resolução do modelo do campo afastado, ou seja, quando o lançamento apresenta uma ou mais características que se seguem: o lançamento pode ser considerado uma fonte passiva (por exemplo, é feito em corpos d'água de pouca profundidade e/ou próximo a contornos fechados; a quantidade de efluente lançada é pequena e/ou apresenta baixa velocidade inicial, não gerando descontinuidade induzida de velocidade (BLENINGER, 2006)). Nestes casos, a diluição inicial do campo próximo está embutido na difusão numérica no primeiro passo temporal.

2.4.2 Acoplamento passivo

Outra forma de acoplamento consiste na introdução dos resultados do modelo de campo próximo obtidos na zona de transição (fronteira de superfície ou de fundo, ou a altura de equilíbrio, aprisionamento da pluma) no modelo de campo afastado. Sendo que este pode ser um modelo Euleriano ou Lagrangeano. Esta é a forma de acoplamento mais utilizada e também é chamada de acoplamento *offline* ou em uma direção.

Zhang e Adams (1999), realizaram este tipo de acoplamento entre o modelo de campo próximo RSB e o modelo de campo afastado ECOM-si, apresentando quatro diferentes formas de inserção da massa do efluente (M) e do fluxo da descarga (Q_0), conforme pode se observar na Figura 8.

No método I, a massa do efluente M é inserida juntamente com o fluxo de água doce, Q_0 . Desta forma, os efeitos dinâmicos associados à flutuabilidade do efluente e a sua quantidade de movimento estão incluídos implicitamente. Como os modelos de campo afastado não conseguem calcular a altura de estabilização do jato no campo próximo devido a simplificação hidrostática, os coeficientes de mistura, a resolução da grade numérica e os parâmetros do efluente podem ser ajustados localmente ou globalmente. A vantagem da introdução das cargas na fonte é que toda a pluma é simulada juntamente com a dinâmica do efeito da água doce sobre o ambiente. Assim, as reações e processos de decaimento nos primeiros estágios da mistura e transporte dos efluentes podem ser tratados corretamente.

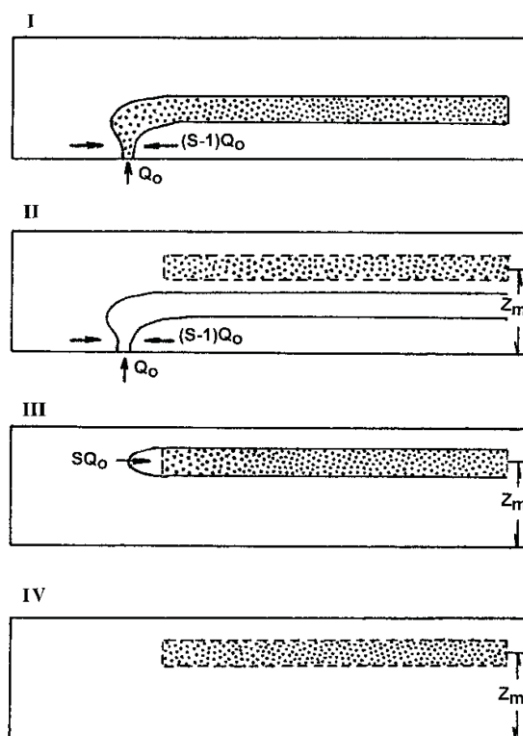


Figura 8 – Possíveis formas de inserção da massa do poluente (M) e do fluxo da descarga (Q_0) no modelo de campo afastado: (I) Massa e fluxo na fonte; (II) fluxo na fonte e massa na altura determinada por um modelo de campo próximo; (III) fluxo e massa diluídos na altura de finalização do campo próximo; (IV) somente massa na finalização do campo próximo.
Fonte: Zhang e Adams, (1999).

No método II, a massa do efluente (M) é introduzida na profundidade de estabilização do jato (Z_m) determinada pelo modelo de campo próximo (aqui RSB), enquanto a vazão do efluente (Q_0) é introduzida no local da fonte. A altura calculada pelo modelo campo próximo pode ser diferente da altura calculada pelo modelo do campo afastado, podendo gerar um espalhamento gravitacional incorreto dos efluentes (ZHANG, 1995).

No método III, os efeitos do espalhamento gravitacional são considerados pela introdução da quantidade correta da vazão efluente diluída SQ_0 , na altura Z_m calculada pelo modelo do campo próximo, juntamente com a massa do poluente M . O modelo de campo próximo calcula corretamente o valor da diluição S . Porém, como o sumidouro causado pelo arraste é desprezado, adiciona-se massa no domínio e o padrão de fluxo real de arraste próximo ao local da fonte é ignorado. Este método pode ser justificado pois o modelo de campo afastado não consegue simular os detalhes do campo próximo, e o fluxo padrão desta região possui relativamente um efeito insignificante no modelo de campo afastado uma vez que a diluição inicial e a altura de estabilização já foram considerados.

No último método, a massa M do efluente é introduzida na altura de estabilização do jato, calculada pelo modelo do campo próximo e não há fluxo do efluente no campo afastado. Deste modo, esta opção assume que os efeitos dinâmicos são desprezíveis no domínio computacional. Comparando-se os resultados das simulações feitas por Zhang e Adams (1999) deste método com os três anteriores, foi verificado que neste caso o espalhamento lateral é subestimado devido a omissão da circulação gravitacional. Entretanto, isto é compensado pelo fato que o espalhamento lateral é usualmente exagerado, devido a difusão numérica associada a resolução grosseira da grade. O método assim é válido para lançamentos onde efeitos dinâmicos do campo próximo ao campo afastado são insignificativos.

Kim *et al.* (2001), desenvolveram um modelo tridimensional de campo afastado de trajetória de partículas com camadas σ , combinado com um modelo de campo próximo de modo a obter um modelo híbrido para prever as características da zona de mistura de efluentes lançados no oceano por emissários submarinos. O modelo de campo próximo baseia-se nas equações de plumas lineares sugeridas por Roberts *et al.* (1989a, c, d), a advecção e a difusão são modeladas no campo afastado pelo modelo lagrangeano de partículas, e o campo de velocidades do escoamento ambiente é obtido por um modelo hidrodinâmico tridimensional. No modelo de trajetória de partículas, estas são introduzidas ao final da zona inicial de mistura de modo que as posições iniciais são igualmente espaçadas na horizontal e espalhadas segundo uma distribuição normal na vertical para representar a forma da pluma.

O modelo proposto foi aplicado ao sistema de disposição oceânica de efluentes domésticos de Masan-Changwon, Coréia, e seus resultados foram comparados com dados medidos em campo de metais traço contidos no sedimento que foi depositado próximo ao emissário de Masan.

Em 2002, os mesmos autores propuseram um modelo híbrido tridimensional para a descarga de jatos com flutuabilidade provenientes de um único bocal. Neste modelo, a mistura inicial foi simulada com um modelo de jato integral e o processo de advecção-difusão foi simulada com um método de trajetória de partículas. Quando o elemento da pluma atinge a altura de equilíbrio de flutuabilidade, o mesmo é substituído por partículas (Figura 9). A distribuição das posições das partículas é usualmente representada por uma distribuição Gaussiana. A partir deste momento as partículas sofrem advecção e difusão pelo

campo de velocidades ambiente medido ou calculado por um modelo hidrodinâmico. Para o desenvolvimento deste trabalho as velocidades foram interpoladas a partir dos resultados de um modelo de jato integral. Neste procedimento, assume-se que o fluxo do efluente não altera o campo de velocidades, e que o fluxo volumétrico descarregado pelo difusor é desprezível no escoamento ambiente (KIM *et al.*, 2002). Para verificação do modelo, seus resultados foram confrontados com experimentos laboratoriais.

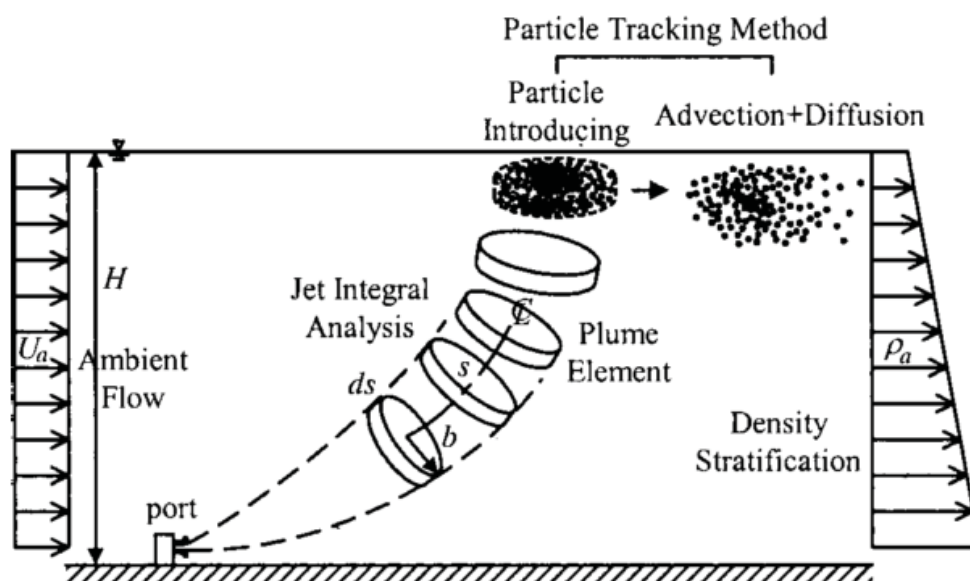


Figura 9 – Diagrama conceitual do modelo híbrido proposto por Kim *et al.* (2002).

Nos experimentos laboratoriais foram feitas variações na relação velocidade ambiente/velocidade de descarga ($k = U_a/U_0$) de 0,06 a 0,58 e no número de Froude densimétrico ($F_j = U_0/\sqrt{g'_0 d_p}$, $g'_0 = (\Delta\rho/\rho)g$) variou de 2,04 a 17,46. Também houve variação na direção da descarga com relação a direção do fluxo ambiente: paralelo (*coflow*), oblíquo (*oblique flow*) e perpendicular (*cross-flow*). O modelo proposto determinou satisfatoriamente as características da pluma para várias relações de velocidade (k), assim como as trajetórias da linha central da pluma e a distribuição de concentrações verticais ao longo da linha central do jato paralelo ao escoamento ambiente. Nos casos em que a relação de velocidade era muito alta e a quantidade de movimento baixa, a pluma se afasta da fonte similarmente a um efluente térmico lançado em um ambiente dominado pela advecção. Neste caso, este modelo utilizando apenas a distribuição Gaussiana tende a subestimar a largura da pluma.

Bleninger e Jirka (2004) propuseram uma metodologia de acoplamento entre o CORMIX e o Delft3D, baseada em quatro etapas: 1) modelagem da hidrodinâmica do

ambiente com o Delft3D-FLOW para a determinação do campo de velocidades e perfis de densidade para diferentes condições ambientais; 2) modelagem da hidrodinâmica e transporte no campo próximo com CORMIX; 3) acoplamento do CORMIX com o Delft3D-FLOW; e 4) modelagem do campo afastado com o Delft3D-Part ou Delft3D-WAQ. Na primeira etapa os perfis de velocidade são espacialmente promediados e classificados em duas classes: uniforme ou estratificado. Neste último caso, os perfis estratificados são classificados em tipo A (linearmente variável ao longo de toda a coluna d'água), B (coluna d'água com duas camadas com densidade constante nas duas camadas), C (coluna d'água com duas camadas sendo a camada superior com densidade constante e a inferior linearmente variável) conforme a classificação do CORMIX. O campo de velocidades é dividido em verticalmente uniforme ou não-uniforme, e este dividido em perfis unidirecionais ou não unidirecionais. Esses dados, juntamente com a elevação do nível da água no local da descarga, formam os arquivos de séries temporais que serão utilizados como dados de entrada para a etapa 2. Além destes arquivos, a etapa 2 requer a especificação de dados do efluente e da geometria do difusor. Os resultados do CORMIX (trajetórias da pluma e diluições ou concentrações) são divididos em duas classes: pluma que aflora na superfície ou pluma aprisionada, sendo determinados para cada arquivo de série temporal de entrada a geometria da pluma, a orientação da linha central da pluma e sua localização vertical, o fluxo volumétrico e o fluxo mássico na posição de acoplamento. Esta é definida em função da resolução da grade numérica do modelo de campo afastado. Na etapa 3, o fluxo mássico e a descarga volumétrica são especificados nas células do Delft3D-FLOW onde irá ocorrer o acoplamento, e este modelo é executado novamente agora com as fontes adicionais. Na quarta e última etapa a modelagem do transporte é realizada ou com o modelo Euleriano (Delft3D-WAQ) ou com o modelo Lagrangeano (Delft3D-Part). Se na etapa 3, verifica-se a presença de muita difusão numérica ou uma influência menor da velocidade induzida pelo efluente no transporte da pluma, a abordagem Lagrangeana é mais apropriada. Caso contrário, especialmente para longos períodos de simulação, o Delft3D-WAQ deve ser utilizado.

Além destes trabalhos, outros autores desenvolveram modelos de campo intermediário, onde o acoplamento entre diferentes modelos de campo afastado ocorre de maneira passiva com diferentes modelos de campo próximo para efluentes domésticos (CHIN, 1985; FEITOSA, 2007; GREGORIO, 2009; LEITÃO *et al.*, 2004; LI, S.; HODGINS, 2004;

ROBERTS, 1999; ROBERTS; VILLEGAS; MORELISSEN, 2015; ROBERTS, 1999). Segundo Choi e Lee (2007) estes trabalhos, quando comparados com dados medidos em campo apresentam subestimação de algumas características da pluma (largura, diluição inicial) e/ou não conseguem representar de maneira satisfatória a distribuição de concentrações e o perfil vertical de densidade.

Dentro deste mesmo tipo de acoplamento, Suh (2001) desenvolveu um modelo híbrido para a descarga de águas de refrigeração e van Gastel; Meulenens (2011) para descargas de dessalinização. A alteração do tipo de efluente não isentou esta forma de acoplamento de limitações e/ou não concordância com dados medidos.

2.4.3 Acoplamento dinâmico

Segundo Choi e Lee, 2007, as formas de acoplamento nulo e passivo apresentados nos itens 2.4.1 e 2.4.2 não conseguem representar satisfatoriamente os efeitos dinâmicos de mistura da pluma no modelo de campo afastado para todos os tipos de combinação do sistema “difusor - tipo e quantidade de efluente - escoamento ambiente”, e a interpretação dos dados experimentais também é prejudicada pela falta de um método numérico robusto preditivo para a mistura no campo intermediário.

De modo a preencher esta lacuna, Choi e Lee (2005); Choi e Lee (2007) propuseram um método para modelar a mistura e transporte do efluente no campo intermediário pelo acoplamento dinâmico de um modelo tridimensional de campo afastado com um modelo Lagrangeano de campo próximo. Este método é chamado de Abordagem de Sumidouros Distribuídos por Arraste (*Distributed Entrainment Sink Approach* - DESA). A ação da pluma no escoamento circundante é modelada inserindo-se uma série de sumidouros devido ao arraste distribuídos ao longo da trajetória da pluma, e para garantir a conservação da massa, uma entrada de fluxo equivalente à fonte diluída e a carga, na altura de equilíbrio calculada. Estas fontes e sumidouros são determinados pelo modelo de campo próximo e são incorporadas no modelo de campo afastado como o Q_s da equação da continuidade (2) representando o processo de arraste ou de fluxos diluídos (Q^e) e o Q_c da equação de transporte advectivo-difusivo (6) (Figura 10). Estes dois termos podem ser obtidos do modelo de campo próximo no nível da malha computacional. A principal diferença entre este método e o acoplamento passivo está no fato de que os processos de mistura gerados pelo campo próximo são resolvidos na escala da pluma pelo modelo de campo próximo e as

alterações nas velocidades e nas características do ambiente (salinidade, temperatura e/ou concentração de traçadores) geradas pelo lançamento voltam como dados de entrada para o modelo de campo próximo e são modeladas de modo dinâmico. A solução das equações da continuidade, quantidade de movimento e transporte de escalares gera um escoamento e campo de escalares atualizado.

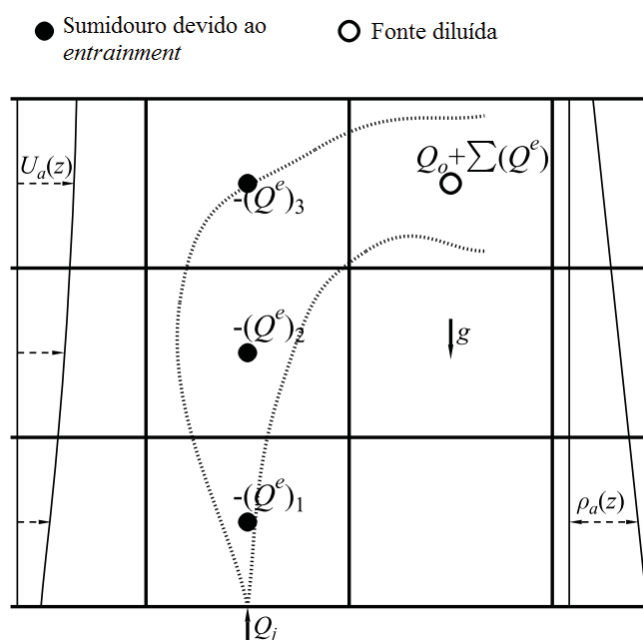


Figura 10 – Representação dos sumidouros devido ao processo de arraste (Q^e) ao longo da trajetória do jato na grade do modelo do campo afastado juntamente com a localização do ponto de inserção do fluxo de massa diluído.

Fonte: Lee e Choi (2007), modificado pelo autor (2015).

Com o escoamento e as distribuições de massa calculados no campo afastado, o modelo de campo próximo pode ser regido pelas condições ambientais atualizadas para gerar novos termos de fonte e sumidouros para o próximo passo. Desta forma, o acoplamento dinâmico em duas direções é garantido.

O acoplamento foi realizado utilizando o modelo JETLAG de campo próximo e o modelo EFDC - *Environmental Fluid Dynamics Code* (USEPA, 2007) de campo afastado. O JETLAG é um modelo lagrangeano e o EFDC é um modelo em diferenças finitas que utiliza o esquema desenvolvido por Mellor e Yamada (1982) como modelo de fechamento da turbulência. No modelo JETLAG o arraste turbulento de massa para um elemento da pluma é a composição de dois processos: (i) o arraste por cisalhamento que é calculado como sendo uma função da velocidade relativa do jato na direção do eixo do jato, e do raio e espessura do elemento da pluma, e (ii) o arraste por vórtices devido ao fluxo transversal ambiente, que

é uma função da densidade e velocidade ambiente, do raio e espessura do elemento da pluma e da inclinação deste em relação ao escoamento ambiente.

Para verificar a performance do método proposto, uma larga faixa de escoamentos complexos foram estudados, demonstrando que os resultados da metodologia proposta apresentam ótima concordância com os dados experimentais.

Foi verificado que este método pode ser aplicado em grades horizontais na faixa de 0,5 a 3 vezes a profundidade local para o campo intermediário próximo a descarga, e 15 a 20 camadas uniformes para resolver a estrutura vertical. Além destas limitações, este método não resolve completamente processos do campo intermediário que são função das correntes de densidade e não do arraste.

Os demais trabalhos envolvendo acoplamento dinâmico entre modelos de campo próximo e campo afastado utilizaram a técnica desenvolvida por Choi e Lee (2007). Lai *et al.* (2007) investigaram, com o uso de uma série de experimentos, as características de mistura no campo próximo e intermediário de um difusor tipo “rosette”, obtendo bons resultados.

Em 2013, dois trabalhos foram apresentados dentro desta mesma linha de pesquisa. Zhao *et al.* (2013), apresentaram a simulação 3D da descarga de água de produção¹ *offshore*. Um método explícito de 2ª ordem de diferenças finitas foi usado para modelar a dispersão no campo afastado e este método foi acoplado com o modelo JETLAG com uma extensão das condições 3D de fluxo transversal para simular os processos de campo próximo. Isto foi feito pois as variações de corrente em áreas *offshore* são tridimensionais, e é o ponto de diferenciação com relação ao trabalho de Choi e Lee (2007) que considerou apenas escoamento ambiente horizontalmente uniforme.

Morelissen; van der Kaaij e Bleninger (2013) apresentaram a primeira etapa do acoplamento dinâmico e *online*² entre o modelo de campo próximo CORMIX e o modelo de campo afastado Delft3D-FLOW, o acoplamento entre os modelos de jato integrais, Jet3D e CORJET, e o Delft3D. Esta primeira etapa serviu para verificar a estabilidade numérica e validar o esquema de acoplamento por meio de comparações com experimentos laboratoriais. A segunda etapa que consiste no acoplamento do sistema CORMIX ao Delft3D está em andamento e está operacional para uma limitada seleção de classes de escoamento

¹ A água de produção é um grande volume de efluente gerado durante o processo de recuperação do óleo e gás.

² *Online* significa que durante a simulação do campo afastado, os resultados computacionais são usados para definir a entrada da simulação do campo próximo e que os resultados do campo próximo são usados na simulação do campo afastado.

do CORMIX. Atualmente, está implementado para casos de acoplamento de descargas de água de refrigeração (flutuabilidade positiva) provenientes de um único bocal em um fraco escoamento ambiente transversal, que possui uma interação de contorno com a superfície livre. Estes resultados iniciais mostram que o acoplamento necessita ser melhor validado com dados experimentais e de campo, e que o local ótimo e o passo de tempo para o acoplamento, levando em consideração o tempo de percurso da pluma sob diferentes condições ambientais, é assunto de pesquisas futuras.

Em 2015, Morelissen e colaboradores aplicaram o acoplamento dinâmico para um estudo de engenharia voltado ao lançamento de águas de resfriamento em grande escala de uma empresa de energia da Coreia do Sul. Os resultados das simulações foram confrontados com dados medidos em campo assim como com resultados numéricos obtidos com o acoplamento passivo, e somente o acoplamento dinâmico mostrou-se capaz de reproduzir fenômenos incomuns observados nos dados medidos (MORELISSEN *et al.*, 2015).

2.5 CRITÉRIOS PARA O ESTABELECIMENTO DO TIPO DE ACOPLAMENTO

De acordo com Bleninger (2006) quando o lançamento modifica fortemente o corpo receptor de modo que as alterações induzidas na velocidade e nas concentrações são notadas para além do campo próximo e intermediário, o acoplamento dinâmico deve ser utilizado para incluir também o acoplamento da quantidade de movimento.

Ainda segundo o mesmo autor, o acoplamento dinâmico deve ser utilizado quando pelo menos um dos critérios listados a seguir é satisfeito:

- i. Critério 1: O campo próximo é considerado instável (equação (11)) de acordo com a classificação de fluxo do CORMIX;
- ii. Critério 2: Análise da quantidade de movimento distribuída ao longo da profundidade, $l_m / H > r_{crit}$, onde $l_m = m_0 / u_a^2$ é a escala de comprimento jato/fluxo transversal (m), $m_0 = M_0 / L_D$ é o fluxo de quantidade de movimento ($M_0 = u_0 Q_0$) pelo comprimento do difusor (m^2/s^2), u_a e u_0 são as velocidades do ambiente e do lançamento (m/s), respectivamente, Q_0 é o fluxo de lançamento (m^3/s), H é a profundidade total (m) e r_{crit} é um valor crítico relacionando o fluxo de quantidade de movimento do lançamento e do ambiente.

O segundo critério relaciona a quantidade de movimento do lançamento distribuída ao longo da profundidade, m_0 / H , pela quantidade de movimento do ambiente por unidade de profundidade, u_a^2 . Esta relação é comparada ao valor de r_{crit} que é definido como sendo igual a 1, porém este valor precisa ser validado com experimentos (BLENINGER, 2006).

Nos demais casos, deve-se utilizar o acoplamento passivo, uma vez que o acoplamento nulo não é recomendado principalmente para emissários submersos devido a problemas relacionados a acurácia da representação dos processos físicos no campo afastado e também à forte dependência dos aspectos numéricos do modelo de campo afastado (MORELISSEN *et al.*, 2015).

Além destes dois critérios, também foi analisado o número de Froude ambiental, $F_a = u_a^3 / j_0$, onde j_0 é o fluxo de fluatibilidade por unidade de comprimento da linha de difusores. Baseado em experimentos de lançamento de fontes lineares em escoamentos com velocidade uniforme, Roberts (1979) apud Lee; Choi (2007); Tian; Roberts; Daviero (2004), encontrou três regimes de escoamentos em função do valor de F_a : (i) com baixas velocidades, $F_a \sim 0,1$, o efluente se comporta como uma pluma formando uma camada superficial que se espalha horizontalmente em todas as direções (montante, jusante e laterais). A largura da pluma na superfície sobre o difusor é maior do que o comprimento do mesmo; (ii) a medida que F_a aumenta, a camada de espalhamento horizontal é carregada para jusante; a pluma atinge o leito (contorno inferior) e permanece anexada ao mesmo, ocasionando a mistura em toda a coluna d'água e, (iii) para $F_a \sim 10$ o escoamento é dominado pela advecção e o espalhamento lateral da pluma na superfície é bastante limitada.

2.6 RESUMO DOS MÉTODOS DE ACOPLAMENTO

Partindo da análise do estado da arte na área de modelagem de jatos/plumas provenientes de emissários submarinos ou subfluviais, principalmente no que se refere ao acoplamento dos modelos de campo próximo e afastado, pode-se verificar que:

- Os trabalhos que realizam algum tipo de acoplamento apresentam enfoque na variação da concentração de traçadores/efluentes, salinidade e/ou temperatura;

- Os diferentes tipos de acoplamento (nulo, passivo, dinâmico) fornecem resultados satisfatórios somente para algumas combinações do sistema “difusor - tipo e quantidade de efluente - escoamento ambiente”;
- Os estudos e pesquisas estão voltados para a resolução de problemas específicos do sistema “difusor - tipo e quantidade de efluente - escoamento ambiente”;
- As abordagens de acoplamento existentes apresentam problemas, especialmente nas situações em que a água não apresenta movimento ou apresenta baixas velocidades, que usualmente são consideradas os cenários de pior caso;
- Ainda não existem estudos que baseados em escalas características indiquem o tipo de acoplamento mais apropriado a ser realizado.

Dentro desta perspectiva, a contribuição deste trabalho foi a implementação e análise de diferentes tipos de acoplamento (nulo, passivo e dinâmico) visando a compreensão dos processos hidrodinâmicos que ocorrem na interação entre o jato/pluma e o escoamento ambiente, assim como o estabelecimento de critérios, baseados em escalas características, que indiquem qual o acoplamento mais apropriado a ser utilizado, onde e quando o acoplamento deve ocorrer.

A seguir apresentam-se os métodos a respeito de como este trabalho foi desenvolvido.

3 MODELOS E MÉTODOS

Para a realização das simulações hidrodinâmicas estão sendo utilizados os modelos dos sistemas CORMIX e Delft3D, distribuídos respectivamente por MixZon e Deltares, que serão explicados detalhadamente nos itens que se seguem, assim como uma explicação do acoplamento dinâmico entre estes dois modelos hidrodinâmicos.

3.1 MODELOS

3.1.1 CORMIX

O sistema de modelagem CORMIX (*Cornell Mixing Zone Expert System*) é um *software* para análise, previsão, e design de descargas convencionais e tóxicas em diferentes tipos de corpos d'água receptores, e foi desenvolvido pelo professor Gerhard H. Jirka em parceria com o USEPA (*United States Environmental Protection Agency*). O sistema possui um modelo integral de jato flutuante (CORJET), cuja formulação matemática é apresentada no Apêndice C, juntamente com as melhorias que possibilitam a interação com os contornos dentro da zona de mistura. O CORMIX enfatiza a mistura em estado permanente do campo próximo e contém métodos para prever condições dentro da zona de mistura regulatória que tipicamente ocorre após a interação com os contornos na região do campo afastado. Possui sistemas para modelar difusores de um orifício (CORMIX1) (DONEKER; JIRKA, 1990), de multiorifícios (CORMIX2) (AKAR; JIRKA, 1991) e lançamentos realizados na superfície livre (CORMIX3) (JONES *et al.*, 2007), considerando descarga de efluentes conservativos e não conservativos, águas de resfriamento, águas de dessalinização e efluentes contendo sedimentos em suspensão.

O CORMIX executa a seleção do modelo de simulação baseada no conceito de escalas características que serão definidas no item 3.1.1.1, como uma medida de influência de cada processo de mistura potencial, ou em outras escalas similares para casos mais complicados. Empregando um sistema inteligente baseado em regras aplicadas aos dados de entrada, ocorre a seleção do modelo hidrodinâmico que simula os processos físicos de mistura dentro de uma determinada interação descarga-ambiente (DONEKER, 2013; JIRKA; AKAR, 1991; JIRKA; DONEKER, 1991; SOCOLOFSKY *et al.*, 2013).

O sistema CORMIX contém ainda um modelo de jato integral (CORJET) e é capaz de reproduzir processos de interação com os contornos e o espalhamento horizontal da pluma no campo intermediário. O sistema CORMIX contempla aproximadamente 60 classes de flu-

xo semelhante aos tipos MS1, MS2, MS3, MS4, MS5, MS6, MS7 e MS8, apresentados na Figura 11 e cuja metodologia de classificação será explicada no item “Escala de comprimento e classificação de escoamento”. O CORMIX determina ao longo da trajetória do jato as suas coordenadas da linha central, a largura da pluma relacionada à distribuição de velocidade e de concentração, assumidas como sendo de formato Gaussiano, a velocidade do jato e a diluição na linha central da pluma. Estes resultados são obtidos a partir das características iniciais da descarga, das características do emissário e das condições ambiente.

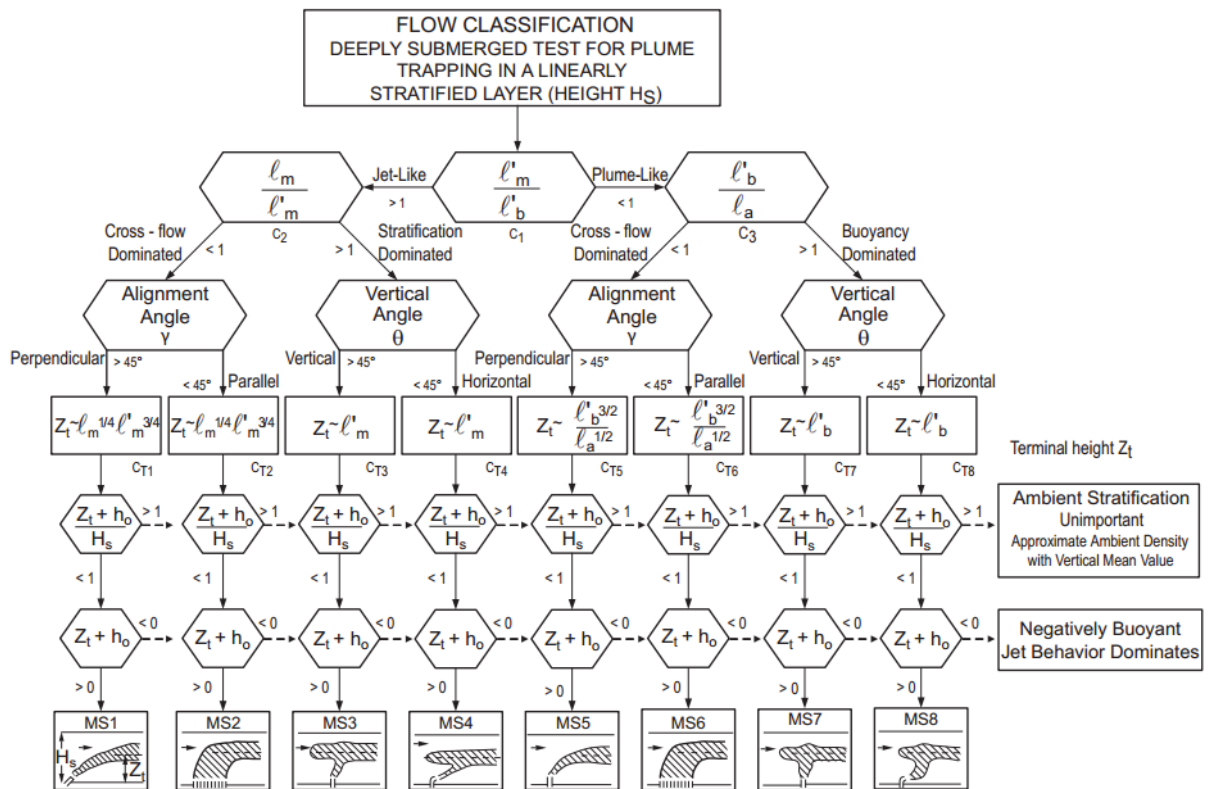


Figura 11 - Exemplo do esquema de classificação de fluxo do CORMIX.

Fonte: Jirka e Akar (1991).

Várias publicações descrevem a base científica para o sistema CORMIX e demonstram a comparação e validação com dados de laboratório e de campo (AKAR; JIRKA, 1991; JIRKA; DONEKER, 1991; JONES *et al.*, 2007).

3.1.1.1 Jatos com fluatibilidade proveniente de multiorifícios

Para altas vazões de efluentes lançados por difusores, a utilização de um único orifício para este lançamento pode não ser suficiente para se obter as diluições necessárias. Nestes casos, são usados difusores multiorifícios para distribuir o efluente através de vários orifícios ao longo da tubulação do difusor.

Uma revisão de estudos realizados para jatos com flutuabilidade proveniente de um único orifício é fornecida em Jirka (2004).

Equações governantes

Jirka (2006) apresenta a extensão da teoria desenvolvida para jatos de um orifício para jatos planos e multiorifícios. Na região onde esta teoria é válida, o campo próximo, os processos são dominados pelas características do emissário, características iniciais do jato e características do escoamento ambiente.

As características do emissário com difusores multiorifícios são definidas como: o comprimento do difusor (L_D), o diâmetro individual de cada orifício (D), a área transversal de cada orifício ($A_0 = \pi D^2/4$), o espaçamento entre orifícios (l), ângulo de orientação (β), ângulo de alinhamento (γ), a altura acima do plano x-y ao plano horizontal onde se localiza a abertura dos orifícios (h_0), um ângulo vertical θ_0 acima da horizontal e um ângulo horizontal σ_0 entre a projeção vertical do jato e o eixo x, conforme se apresenta no esquema da Figura 12.

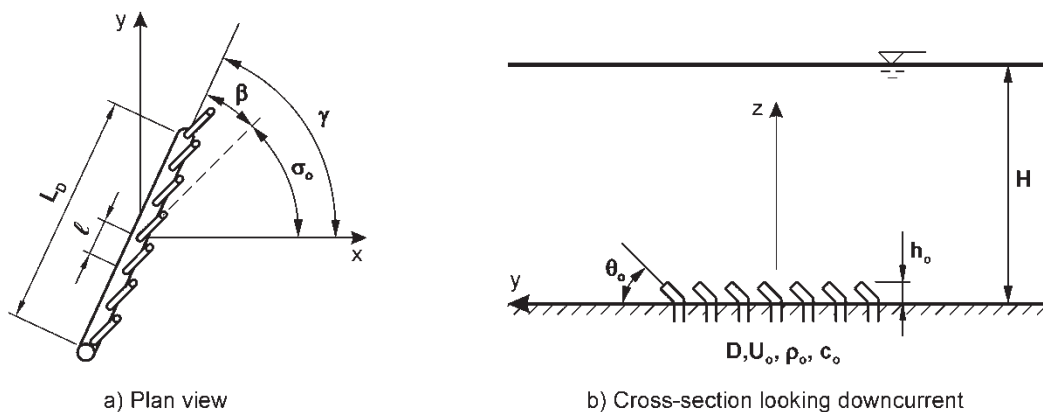


Figura 12 - Esquema de definição para um difusor multiorifício.

Fonte: Jirka; Doneker; Hinton (1996).

A extensão das teorias de jato único para multiorifícios está baseada no conceito de equivalência entre a linha de difusores e um único jato plano bidimensional. As dimensões da abertura do difusor são escolhidas como sendo o comprimento do difusor L_D para o comprimento total e a largura equivalente da abertura B calculada para encontrar os fluxos iguais àqueles causados pelos jatos individuais multiorifícios, onde estes parâmetros e outros que caracterizam os jatos com flutuabilidade planos são apresentados na Figura 13.

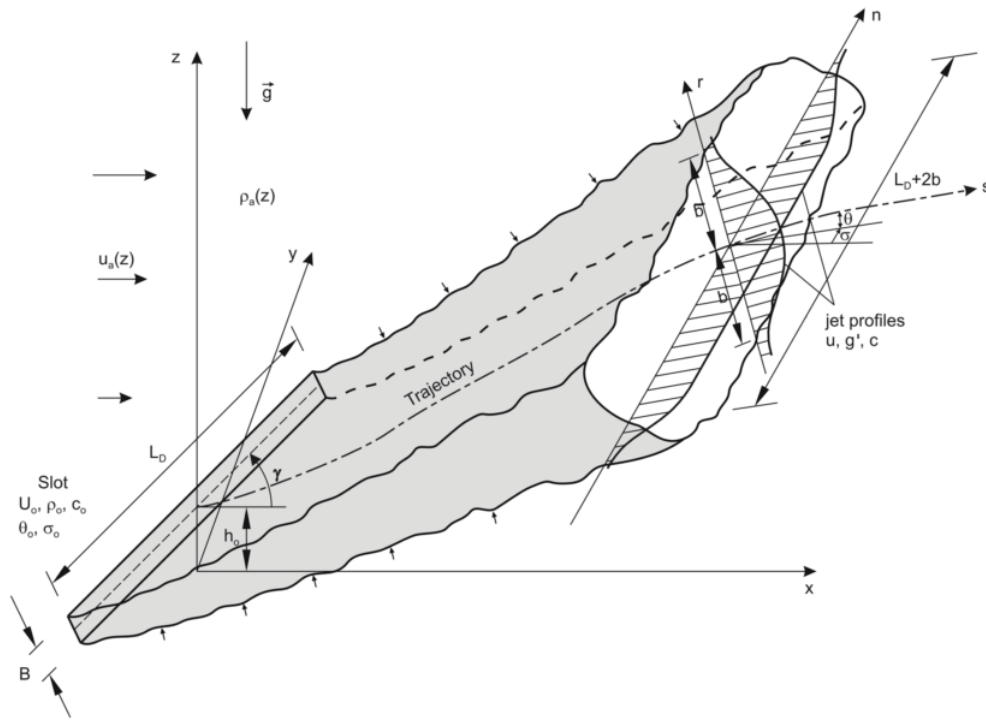


Figura 13 – Representação de um jato plano.
Fonte: Jirka (2006).

As características iniciais dos fluxos para os jatos com flutuabilidade individuais (com subíndice i) e para o plano idealizado são apresentadas nas equações que se seguem:

Fluxo volumétrico inicial:

$$Q_0 = \sum Q_{0,i} = \sum U_{0,i} A_{0,i} = U_0 a_0 \quad (13)$$

Fluxo de massa inicial:

$$Q_{c0} = \sum Q_{c0,i} = \sum U_{0,i} C_{0,i} A_{0,i} = U_0 c_0 a_0 \quad (14)$$

O jato é forçado por duas forças dinâmicas dominantes, o fluxo de quantidade de movimento inicial:

$$M_0 = \overline{M}_{0,i} = \overline{U}_{0,i} \left(\sum U_{0,i} A_{0,i} \right) = U_0^2 a_0 \quad (15)$$

E o fluxo de flutuabilidade inicial:

$$J_0 = \overline{J}_{0,i} = \overline{g'_{0,i}} \left(\sum U_{0,i} A_{0,i} \right) = U_0 g'_0 a_0 \quad (16)$$

onde $g'_0 = g(\rho_a(h_{0,i}) - \rho_0)/\rho_{ref}$ define a aceleração de flutuabilidade inicial³ com relação a uma densidade constante de referência, ρ_{ref} , usualmente um valor da densidade média do corpo receptor; U_0 a velocidade de saída do orifício, ρ_0 a densidade do efluente, $\rho_a(h_{0,i})$ a densidade do ambiente na profundidade de lançamento e c_0 sua concentração.

A caracterização do escoamento ambiente é descrita pela profundidade média do corpo receptor (H) com distribuição vertical estável de densidade ($\rho_a(z)$), e o perfil vertical permanente de velocidade ambiente ($u_a(z)$).

A análise de jatos é baseada na descrição Euleriana da trajetória da linha central s (Figura 13) como uma função das coordenadas cartesianas x, y, z com a sobreposição da descrição Lagrangeana da evolução das quantidades Q, M e J ao longo da trajetória da linha central. As flutuações turbulentas causadas por mecanismos de cisalhamento devido a turbulência acarretam no crescimento gradual da espessura característica do jato $(2b)^4$ e na largura característica $L_D + 2b$ (JIRKA, 2006). O comprimento dos difusores é relativamente grande comparado à espessura da pluma ($L_D/(2b) \gg 1$) normalmente permitindo a desconsideração do arraste nas extremidades laterais da pluma. Desta forma, o crescimento da pluma plana é dominado por processos bidimensionais e os fluxos iniciais (Equações (13) a (16)) divididos pelo comprimento do difusor, ficam:

$$q_0 = U_0 B, \quad (17)$$

$$q_{c0} = U_0 c_0 B, \quad (18)$$

$$m_0 = U_0^2 B, \quad (19)$$

$$j_0 = U_0 g'_0 B. \quad (20)$$

Além dos fluxos iniciais, há interesse na forma de como os fluxos de jato plano q, m e j se desenvolvem ao longo da linha central. Estes dependem das distribuições desconhecidas dos parâmetros de jato u, v e c em um sistema de coordenadas com a distância axial s e a distância transversal r inclinada com ângulo horizontal local θ e o ângulo horizontal σ , sendo definidos como:

³ Também designada de gravidade reduzida.

⁴ O parâmetro b é uma medida tipicamente definida onde o excesso de velocidade é $e^{-1} \cong 0,3679$ (37%) do valor da linha central (JIRKA, 2006).

$$q = \frac{1}{L_D} \int_r u \, dr , \quad (21)$$

$$q_c = \frac{1}{L_D} \int_r uc \, dr , \quad (22)$$

$$m = \frac{1}{L_D} \int_r u^2 \, dr , \quad (23)$$

$$j = \frac{1}{L_D} \int_r ug' \, dr . \quad (24)$$

Retomando as equações governantes (2) a (6), escritas para um sistema de coordenadas $x - y - z$, pode-se reescrevê-las no sistema de coordenadas $r - s$. Fazendo as devidas simplificações, como a desconsideração dos termos que variam com o tempo, uma vez que o modelo a ser aplicado é permanente, nas equações (3) e (4) os termos da força de Coriolis e as forças externas podem ser desconsiderados. Os termos de difusão molecular também são desconsiderados já que para campo próximo os termos advectivos são dominantes. Chegando-se as seguintes equações governantes (JIRKA, 2006):

Equação da continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial rv}{\partial r} = 0 , \quad (25)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru'v') - g' \sin \theta , \quad (26)$$

Equação de transporte de um escalar

$$u \frac{\partial c}{\partial s} + v \frac{\partial c}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rc'v') . \quad (27)$$

Para resolver a trajetória 3D são necessárias três equações adicionais:

$$\frac{dx}{ds} = \cos \theta \cos \sigma , \quad (28)$$

$$\frac{dy}{ds} = \cos \theta \sin \sigma , \quad (29)$$

$$\frac{dz}{ds} = \sin \theta \quad (30)$$

As condições iniciais e de contorno são respectivamente, $u = U_0$, $c = C_0$ e $v = 0$, para $s = 0$, e para $r \rightarrow \infty$ pode-se impor que $u \rightarrow 0$, $c \rightarrow 0$, $\overline{u'v'} \rightarrow 0$ e $\overline{c'v'} \rightarrow 0$.

Análise dimensional

Uma das ferramentas utilizadas para classificar e analisar diferentes tipos de escoamento é a parametrização e o dimensionamento das condições de fluxo. A análise dimensional é uma ferramenta extremamente útil tanto para prever relações entre as variáveis governantes como para a classificação de escoamentos, onde os processos dominantes podem ser determinados para uma posterior modelagem e os processos de menor importância podem ser excluídos, servindo como uma ferramenta de análise de ordem de magnitude.

A análise dimensional pode ser aplicada para cada propriedade do jato flutuante e pode-se, teoricamente, descrever as quantidades características, para os casos considerados com relação às condições do escoamento ambiente, em função dos parâmetros independentes, obtendo-se assim os parâmetros adimensionais. Entretanto, com o aumento da complexidade, o número de parâmetros independentes aumenta e cresce a dificuldade de definir relações consistentes por um lado e por outro lado a necessidade de elaboração de estudos de laboratório. Assim, a análise dimensional fica restrita a casos assintóticos permanentes com algumas leves extensões (BLENINGER, 2006).

Escala de comprimento e classificação do escoamento

As escalas de comprimento são usadas para descrever a importância relativa do fluxo de quantidade de movimento da descarga, o fluxo de flutuabilidade, a velocidade transversal ambiente, e a estratificação pela densidade que controla o comportamento do escoamento, especialmente no campo próximo.

A escala de comprimento baseada na relação entre a quantidade de movimento e o flutuabilidade do jato, $L_M = M_0^{3/4} / J_0^{1/2}$, permite distinguir as regiões dominantes do jato e assim classificar o escoamento, conforme se pode verificar na Figura 14.

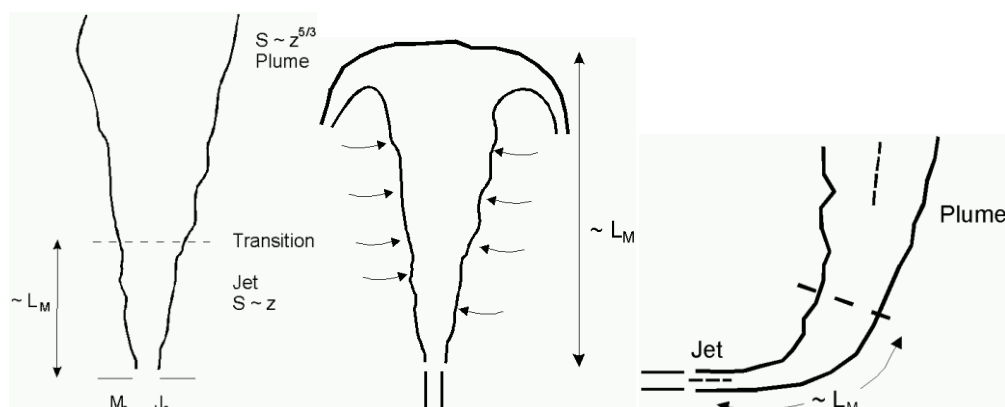


Figura 14 - Representação da escala de comprimento L_M na transição jato-pluma para um jato, permitindo distinguir entre o comportamento de jato ou pluma.

Fonte: Jirka; Doneker; Hinton (1996).

Uma consistente escala de comprimento baseada na categorização de diferentes regimes de jatos com flutuabilidade na presença de escoamento transversal e/ou estratificação é resumida (FISCHER *et al.*, 1979) e modificada para jatos planos por Akar e Jirka (1991), resultando nas seguintes escalas de comprimento, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição das escalas de comprimento e suas respectivas expressões.

Expressão	Escala de comprimento
$l_Q = \frac{q_0^2}{m_0}$	Descarga: representa a dimensão da região sobre a qual a geometria dos difusores possui uma grande influência sobre o fluxo
$l_m = \frac{m_0}{u_a^2}$	Jato/fluxo transversal: representa a distância do ponto onde o jato começa a ser afetado pelo fluxo transversal
$l_M = \frac{m_0}{j_0^{2/3}}$	Jato/pluma: representa a distância em que há a transição entre o domínio da quantidade de movimento e o controle da flutuabilidade em um ambiente parado
$l'_m = \frac{m_0^{1/3}}{\varepsilon^{1/3}}$	Jato/estratificação: denota um dimensionamento para a distância em que o jato se torna fortemente afetado pela estratificação levando à formação de uma camada terminal e um espalhamento horizontal em um ambiente parado linearmente estratificado
$l'_b = \frac{j_0^{1/3}}{\varepsilon^{1/2}}$	Pluma/estratificação: representa a distância em que a pluma se torna fortemente afetada pela estratificação, levando à formação de uma camada terminal e um espalhamento horizontal em um ambiente parado linearmente estratificado
$l_a = \frac{u_a}{\varepsilon^{1/2}}$	Escoamento transversal/estratificação: representa a amplitude de oscilação de um jato quase vertical que atinge sua máxima elevação e ainda possui quantidade de movimento, fazendo com que a mesma suba além da sua posição de flutuabilidade neutra, mas depois retornará devido a sua flutuabilidade negativa

Além destas escalas de comprimento, Nash (1995) e Nash; Jirka (1996) apud Bleninger (2006) descreveram escalas de tempo apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Descrição das escalas de tempo e suas respectivas expressões.

Expressão	Escala de tempo
$t_M = \frac{m_0}{j_0}$	Transição jato/pluma: representa a escala de tempo em que a turbulência gerada pelo jato é preponderante na mistura em um ambiente parado
$t_m = \frac{m_0}{u_a^3}$	Jato/fluxo transversal: denota o tempo necessário para que o escoamento ambiente se torne preponderante

Baseado nas escalas de comprimento apresentadas na Tabela 1 pode-se ressaltar os seguintes detalhes:

- A escala de comprimento de descarga é geralmente muito pequena ($l_Q = B$) e, portanto é relativamente pouco importante;
- Não há escala que relacione a pluma com escoamento transversal (l_b), como ocorre em jatos provenientes de um único orifício (L_b). Isto decorre do fato que a velocidade de uma pluma plana é constante, $\sim j_0^{1/3}$, e na presença de um escoamento transversal uniforme não é possível haver uma separação espacial entre regiões fracamente e fortemente defletidas;
- Relacionando-se a escala de comprimento jato/fluxo transversal com a distância ao longo da trajetória s , deduz-se que para $s/l_m \ll O(1)$ o fluxo de quantidade de movimento inicial por unidade de comprimento irá controlar o fluxo, e para $s/l_m \gg O(1)$ a velocidade terá maior influência no comportamento do jato plano;
- De modo análogo, para $s/l_M \ll O(1)$ o comportamento do escoamento será controlado pela quantidade de movimento e para $s/l_M \gg O(1)$ o fluxo será dominado pela flutuabilidade;
- Em ambientes com estratificação, novas escalas de comprimento são obtidas a partir do relacionamento das características iniciais do jato/pluma com o gradiente de flutuabilidade ambiente definido por $\varepsilon = -(g/\rho_a)(d\rho_a/dz)$.

A classificação do escoamento hidrodinâmico tem como objetivo prever o tipo de escoamento que irá ocorrer para certa descarga/situação ambiente. Uma classificação bem executada possibilita gerar previsões verdadeiras para as propriedades do escoamento, como as distribuições de concentração do poluente, dentro de distintas zonas hidrodinâmicas

pertencentes a cada classe de escoamento. Para cada classe de fluxo, o programa cria e executa uma sequência de módulos relativamente simples de simulação hidrodinâmica. A execução desta sequência permite a visualização do escoamento como um todo e a sua interação com o meio ambiente, prevendo características da trajetória do jato/pluma e da diluição obtida (BLENINGER, 2006).

O procedimento de classificação do escoamento utiliza o conceito de escalas de comprimento a partir da relação entre elas, onde estas foram apresentadas na Tabela 1. No caso de uma análise tridimensional (sobre todo o comprimento), escalas de comprimento adicionais podem ser definidas baseadas em variáveis globais, M_0 e J_0 (equações (15) e (16), respectivamente). Todos esses comprimentos interagem com as características geométricas do corpo d'água, sua profundidade (H), seu parâmetro de estratificação (ε), a altura terminal do escoamento (Z_t)⁵, e também com as propriedades geométricas do difusor, principalmente os ângulos γ e θ (AKAR; JIRKA, 1991).

Assim, a configuração do escoamento no campo próximo parece ser influenciada por um grande número de escalas de comprimento mais os dois ângulos. Significando desta forma que, existe uma ampla variedade de configuração de escoamentos que podem ocorrer em aplicações ambientais.

A classificação do escoamento é um procedimento de 12 passos que é utilizado para determinar qual classe de escoamento, dentre as três maiores categorias de escoamento, uma determinada descarga irá apresentar (JIRKA; AKAR, 1991). Estas três categorias são: (i) fluxo influenciado por uma estratificação linear ocasionando um aprisionamento interno (Classe MS, Figura 11), (ii) fluxo flutuante em um ambiente uniforme (Classe MU, Figura 15), e (iii) fluxo com flutuabilidade negativa em um ambiente uniforme (Classe MNU, Figura 16).

Uma descrição detalhada dos 12 passos utilizados na determinação da classe do escoamento encontra-se em Akar e Jirka (1991).

⁵ A altura terminal do escoamento indica a altura, a partir do fundo, aonde a pluma encontrar-se-á, a altura em que o escoamento entra em equilíbrio com o meio ambiente.

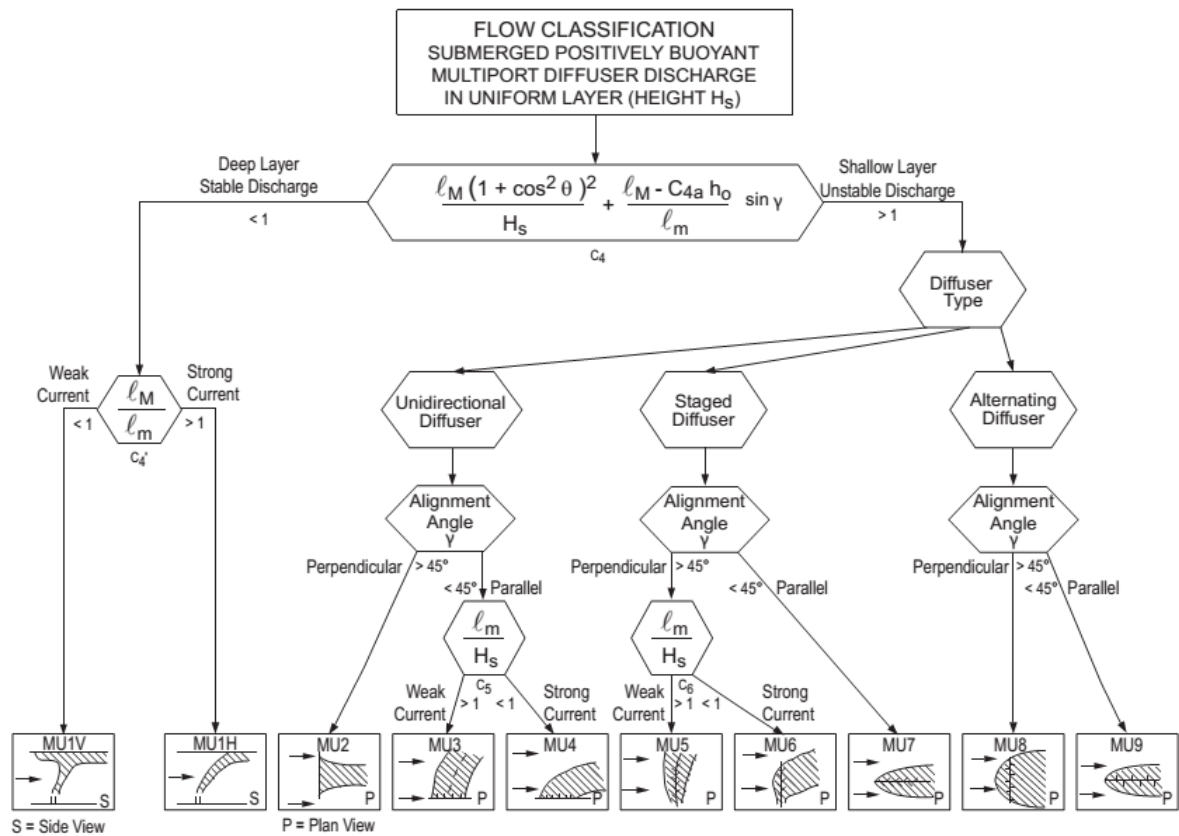


Figura 15 – Classificação de escoamento. Comportamento de descargas com flutuabilidade positiva em ambiente uniforme.

Fonte: Akar e Jirka (1991).

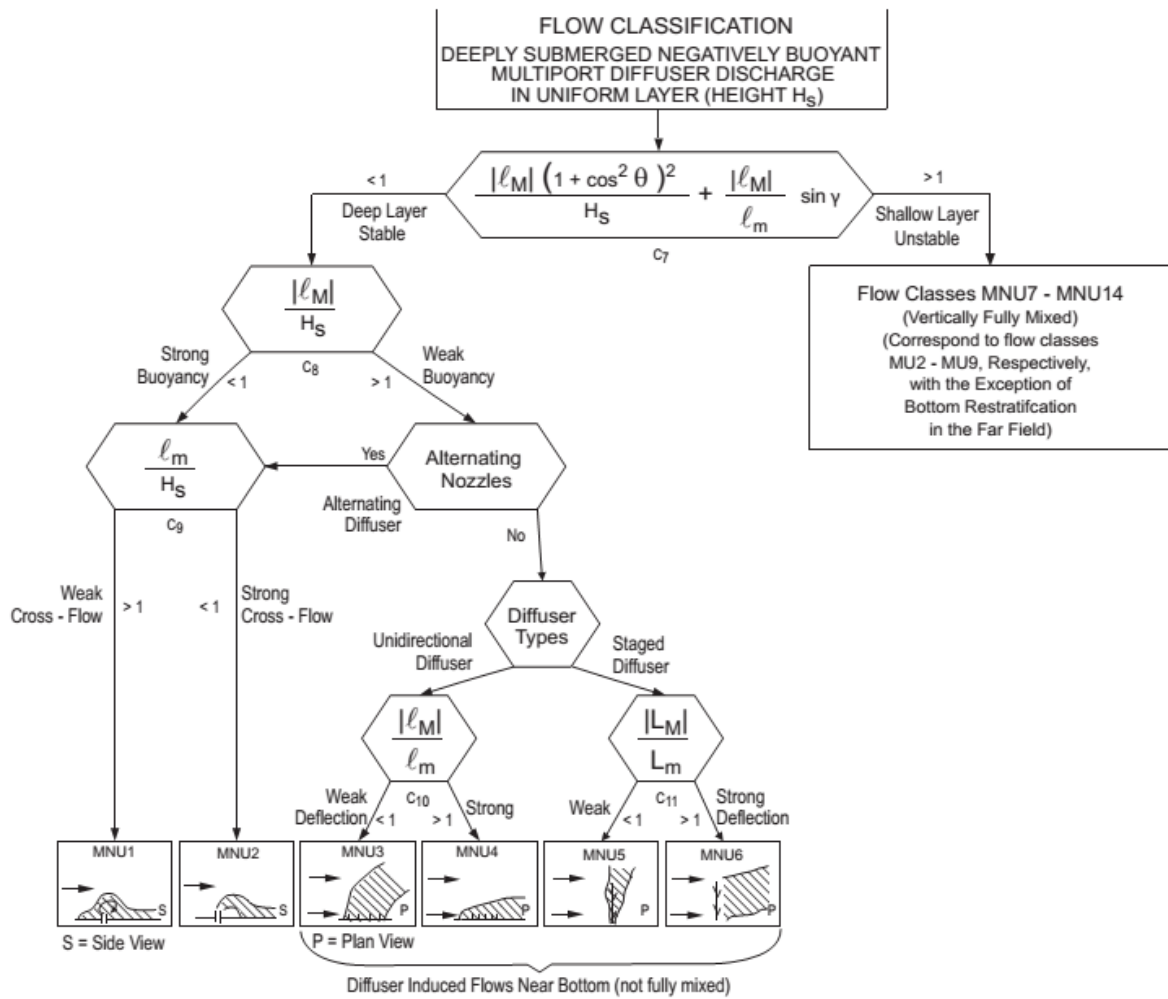


Figura 16 – Classificação de escoamento. Comportamento de descargas com flutuabilidade negativa em ambiente uniforme.

Fonte: Akar e Jirka (1991).

Uma vez o escoamento classificado, os métodos empírico, integral ou numérico são utilizados para prever os detalhes do escoamento.

CorJet

O CorJet, *Cornell Buoyant Jet Integral Model*, foi desenvolvido baseado em Jirka (2004, 2006) e assim como os demais modelos integrais de jato flutuante baseiam-se na hipótese da similaridade: perfis de velocidade, concentração e outras propriedades dos jatos têm a mesma forma em todas as alturas e apenas a magnitude destas propriedades sofrem alteração. Estes perfis são usualmente descritos como funções Gaussianas, por serem os que mais se aproximam de dados experimentais (JIRKA, 2004):

$$u(s, r) = u_c(s) \exp\left(-\frac{r^2}{b^2}\right) + u_a(z) \cos \sigma \cos \theta, \quad (31)$$

$$g'(s, r) = g'_c(s) \exp\left(-\frac{r^2}{(\lambda b)^2}\right), \quad (32)$$

$$X_i(s, r) = X_{ic}(s) \exp\left(-\frac{r^2}{(\lambda b)^2}\right) + X_{ia}(z), \quad (33)$$

$$c_i(s, r) = c_{ic}(s) \exp\left(-\frac{r^2}{(\lambda b)^2}\right) + c_{ia}(z). \quad (34)$$

onde o subíndice c indica quantidades da linha do centro do jato, e são quantidades de excesso, acima dos seus valores no ambiente (subíndice a), X_i são os parâmetros de estado (temperatura, salinidade), λ é o fator de espalhamento, correção para o cálculo da concentração, para incluir o efeito da dispersão.

Sua formulação considera a seguinte estratégia: (i) a evolução da trajetória do jato segue uma formulação Euleriana, uma vez que na média o campo de velocidades é permanente; (ii) as equações governantes do movimento e de transporte turbulento (equações (25) a (27)) precisam ser integradas no sistema de coordenadas locais ao longo da seção transversal plana por unidade de largura nas especificações dos perfis apresentados nas equações (31) a (34); (iii) o crescimento gradual da zona de turbulência pode ser descrita por um modelo de arraste.

Detalhes sobre as equações que representam a estratégia da formulação do modelo CorJet apresentado acima são descritos no Apêndice C.

3.1.1.2 CorTIME

O CorTIME é uma ferramenta implementada no CORMIX que permite o cálculo automático de uma base de dados em séries temporais, permitindo uma análise das variações no ambiente de descarga (correntes e densidade) e/ou características da descarga. O CorTIME também permite o acoplamento automatizado e dinâmico do CORMIX com modelos de campo afastado, podendo gerar condições de contorno para estes modelos.

O CorTIME executa o CORMIX a cada passo de tempo, calculando as coordenadas x , y e z da região final do campo próximo e da zona de mistura com suas respectivas diluições, concentrações, espessura e largura da pluma e o tempo que o efluente precisa para chegar a estas coordenadas (*Prediction files*), e também gera arquivos aonde as plumas geradas são armazenadas, possibilitando uma análise conjunta (*Status report file*).

O resultado das simulações do CorTIME auxilia na análise do comportamento da pluma a partir da variação das condições do ambiente, descarga ao longo do tempo e no acoplamento com modelos de campo afastado por meio do fornecimento de condições de contorno para estes modelos.

3.1.2 Delft3D

O Delft3D, desenvolvido pelo WL|Delft Hydraulics, é um sistema de modelagem que consiste de módulos integrados que em conjunto simulam o escoamento hidrodinâmico de águas rasas⁶, o transporte de sal e calor, geração e propagação de ondas curtas, transporte de sedimentos e modificações morfológicas, modelagem de processos ecológicos e parâmetros de qualidade de água. Dentro deste sistema, o principal módulo é o FLOW, que simula a hidrodinâmica, juntamente com o transporte de sal e calor (DELTARES, 2011; LESSER *et al.*, 2004). Na direção vertical o Delft3D pode utilizar o sistema de coordenadas σ ou o sistema de coordenadas z Cartesiano.

3.1.2.1 Delft3D-FLOW

O Delft3D-FLOW resolve as equações não permanentes de águas rasas em duas (promediadas na vertical) ou três dimensões. O sistema de equações consiste na equação da continuidade, nas equações de quantidade de movimento horizontais, na equação de transporte, e no modelo de fechamento de turbulência. A equação vertical de quantidade de movimento é reduzida a relação de pressão hidrostática, pois se assume que as acelerações verticais são pequenas comparadas a aceleração da gravidade e assim são desconsideradas.

As forçantes do escoamento são: a maré nas fronteiras abertas, o vento na superfície livre, os gradientes de pressão gerados pelos gradientes na superfície livre (barotrópico) ou gradientes de densidade (baroclínico).

As considerações e simplificações que o Delft3D adota são (DELTARES, 2011):

- No sistema de coordenadas σ considera-se que a profundidade é bem menor que as escalas horizontais de comprimento, de forma a garantir a validade da aproximação hidrostática;
- O efeito da densidade variável é considerado apenas no termo de pressão (aproximação de Boussinesq);

⁶ Um escoamento hidrodinâmico de águas rasas é aquele que apresenta sua escala espacial característica maior do que 20 vezes a profundidade do corpo d'água aonde o escoamento ocorre. Como consequência a equação de conservação da quantidade de movimento na vertical pode ser simplificada reduzindo-se à expressão da pressão hidrostática.

- As diferenças verticais de densidade são consideradas nos gradientes horizontais de pressão e nos coeficientes de turbulência vertical. Desta forma, o Delft3D pode ser aplicado somente a simulações no campo intermediário e afastado de descargas;
- Com relação às condições de contorno, no fundo assume-se a condição de contorno de deslizamento, onde uma formulação de tensão quadrática de fundo é aplicada; para a energia cinética turbulenta e a dissipação de energia na superfície livre e no fundo o modelo assume a lei logarítmica; nas laterais a tensão de atrito tangencial pode ser desprezada para simulações de grande escala; e o fluxo de massa no fundo e nas paredes é igual a zero;
- As equações governantes são as equações promediadas de Reynolds (*Reynolds Average Navier-Stokes – RANS*), pois as grades numéricas não têm resolução suficientemente grande para resolver as flutuações turbulentas. Estas equações adicionam os termos de tensão de Reynolds, sendo assim necessário a inclusão de modelos de fechamento da turbulência para poder resolver o sistema de equações;
- Considera-se que os coeficientes de viscosidade e difusividade turbulenta são proporcionais à escala de velocidade e de comprimento. Eles podem ser constantes ou calculados por um modelo de turbulência algébrico, $k - L$ ou $k - \varepsilon$, onde k é a energia cinética turbulenta, L é o comprimento de mistura e ε é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta. As equações referentes a estes modelos de turbulência podem ser visualizadas em Gerritsen *et al.* (2007) e DELTARES (2011);
- Os coeficientes de viscosidade e difusividade turbulenta horizontal precisam considerar tanto os efeitos dos vórtices turbulentos 3D como os movimentos horizontais que não são resolvidos pela grade numérica horizontal. Desta forma, a viscosidade turbulenta horizontal é usualmente bem maior do que a viscosidade turbulenta vertical;
- Devido às considerações de escoamento em águas rasas, a turbulência decorre dos gradientes verticais do fluxo horizontal.

As equações governantes no sistema de coordenadas cartesianas, após as simplificações, são apresentadas abaixo e no sistema de coordenadas curvilíneas ortogonais do módulo Delft3D-FLOW são apresentadas no Apêndice D.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\zeta \rho' dz + \\ & + \nu_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f v + M_u \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\zeta \rho' dz + \\ & + \nu_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) - f u + M_v \end{aligned} \quad (36)$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\rho}{\rho_0} g = 0 \quad (37)$$

em que p_a corresponde a pressão atmosférica e ρ' a distribuição de densidade.

O módulo FLOW do Delft3D também possibilita a análise da dispersão de salinidade, calor e de traçadores conservativos ou com decaimento de 1ª ordem com a abordagem Euleriana, onde a modelagem destes processos é realizada pela equação tridimensional de advecção-difusão (equação (6)).

3.1.2.2 Delft3D-PART

O módulo PART do Delft3D é um modelo tridimensional de trajetória de partículas, modelo lagrangeano, que simula o transporte e a dispersão de traçadores (conservativos ou com decaimento de 1ª ordem) ou de manchas de óleo utilizando as velocidades geradas pelo Delft3D-FLOW como dados de entrada. A trajetória de cada partícula é acompanhada ao longo de toda a simulação, onde a posição das partículas (coordenadas x , y e z) é independente da resolução da grade e é influenciada pela advecção (transporte pelo escoamento ambiente), pela difusão (componente aleatório) e pela deposição (sedimentação/erosão). Assume-se que estes processos são determinísticos com exceção do deslocamento aleatório da partícula a cada passo de tempo utilizado para simular a difusão (DELTARES, 2014).

Os lançamentos podem ser realizados de forma instantânea ou contínua e as concentrações são calculadas pelo número de partículas por unidade de volume.

Assim como todos os modelos de trajetória de partículas, o módulo PART é independente do tamanho das células da grade, não apresenta limitações referente ao passo tempo e não apresenta difusão numérica.

3.2 MÉTODOS

Os métodos aplicados neste trabalho consistiram na: (i) implementação dos diferentes esquemas de acoplamento (nulo, passivo e dinâmico) nos sistemas computacionais; (ii) aplicação dos diferentes esquemas de acoplamento a um domínio genérico simplificado em casos permanentes e não permanentes; (iii) análise das alterações hidrodinâmicas no campo afastado gerado pela hidrodinâmica do campo próximo sob a ótica dos diferentes tipos de acoplamento; (iv) definição de critérios que indiquem o tipo de acoplamento apropriado baseado na análise de escalas características; e (v) análise da dispersão do efluentes no campo afastado sob a perspectiva dos diferentes tipos de acoplamento.

Estas etapas foram realizadas utilizando o módulo FLOW do Delft3D com o CORMIX e deve-se ressaltar que o interesse deste trabalho está nas alterações induzidas pelo campo próximo na hidrodinâmica do campo afastado.

3.2.1 Acoplamento nulo

O acoplamento nulo seguiu o método indicado por Zhang e Adams (1999) e não há a execução de um modelo de campo próximo, consistindo somente na execução do Delft3D-FLOW com a inserção de uma fonte de efluentes (lançamento de um traçador considerando apenas inserção de massa) no ponto central da linha de multidifusores do emissário submarino considerado nos casos testes que serão apresentados no item 3.3. Este ponto é dado em termos de coordenadas locais M, N e K, sendo que esta última coordenada é definida de acordo com o tipo sistema de coordenadas, σ ou z , escolhida para a dimensão vertical, conforme se observa na Figura 2.

Na Tabela 4 (página 95) apresentam-se as características do ambiente juntamente com a vazão do efluente lançado em cada teste utilizado com este acoplamento.

3.2.2 Acoplamento passivo

O acoplamento passivo, também chamado de lançamento não diluído, foi executado efetuando-se o lançamento dos efluentes nas células da grade do Delft3D-FLOW ocupadas pela pluma ao final do campo próximo. Este local foi determinado pela execução do COR-

MIX, que além de fornecer as coordenadas x , y e z da linha central da pluma onde o campo próximo finaliza, também fornece informações, neste mesmo ponto, sobre a largura e altura da pluma, diluição e concentração obtida, e o tempo necessário para a pluma alcançar tal ponto.

Como o CORMIX considera a origem dos eixos de coordenadas o ponto central da linha de multidifusores e o Delft3D-FLOW considera a célula inferior esquerda da grade, foi necessário converter o resultado de localização do final do campo próximo do CORMIX para coordenadas UTM e posteriormente em coordenadas locais M, N e K das células da grade do Delft3-FLOW.

Como o interesse do trabalho está nas alterações induzidas pelo campo próximo na hidrodinâmica do campo afastado o lançamento dos efluentes foi realizado no próprio módulo FLOW dentro do *Data Group Operations*, considerando um *Normal Discharge* fornecendo-se apenas a vazão e concentração do efluente. Ou seja, considerando a velocidade do jato igual a zero e desta forma desconsiderando a quantidade de movimento do lançamento. O lançamento foi realizado considerando que a pluma ocupa a parte superior da coluna d'água⁷ e as informações sobre as dimensões da pluma foram utilizadas para calcular a área da pluma ao final do campo próximo, e a partir deste valor foram definidas a quantidade das fontes assim como a sua localização. Na Tabela 3 apresenta-se a largura da área da pluma e a localização das fontes para cada caso teste.

Tabela 3 – Largura da área da pluma ao final do campo próximo para caso teste e localização das fontes para representar esta área em coordenadas locais.

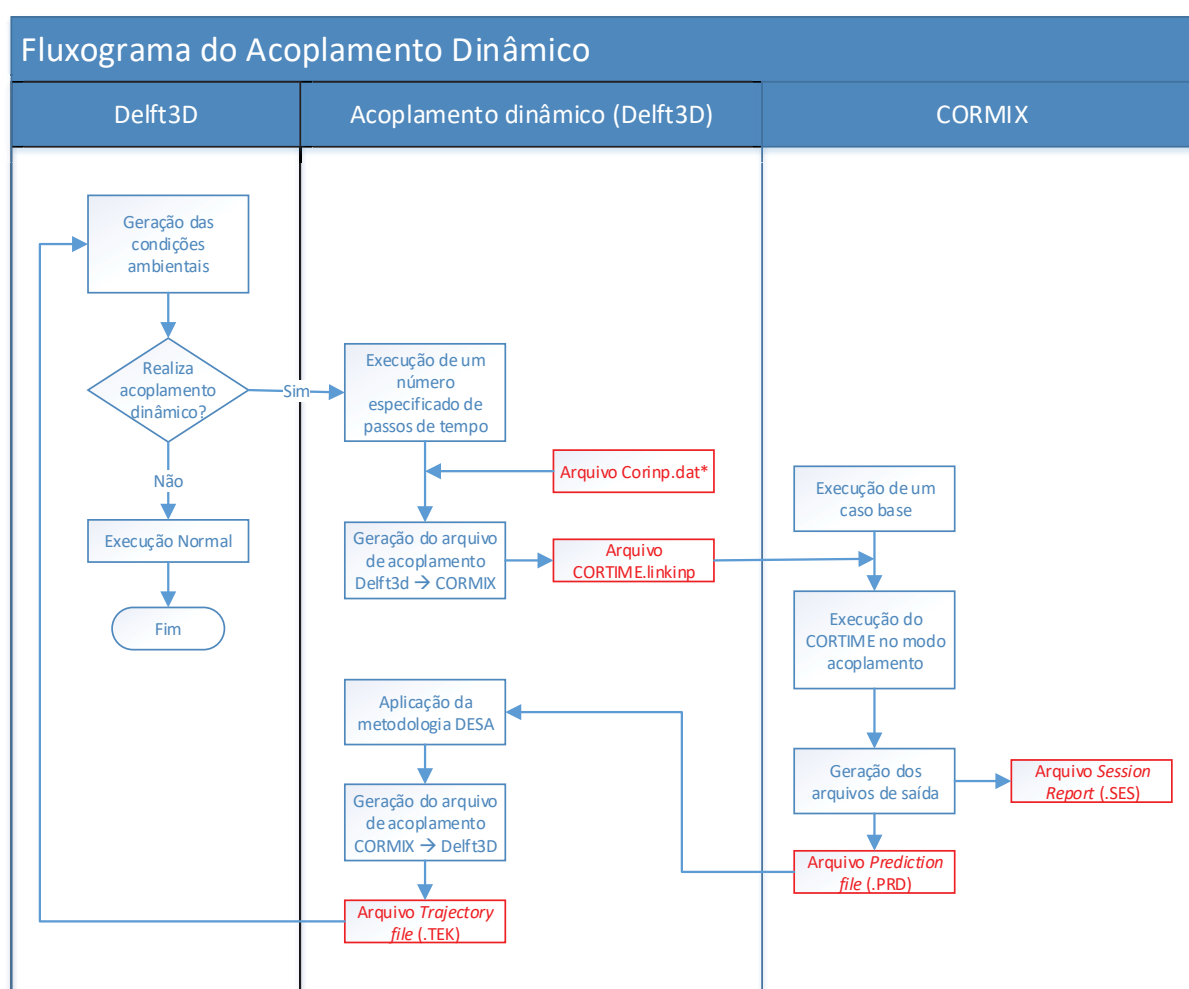
	Largura da pluma (m)	Coordenadas locais		
		M	N	K
Caso teste 1	100,18	126	20, 21	1, 2, 3, 4, 5
Caso teste 2	102,6	126	20, 21	1, 2, 3, 4, 5
Caso teste 3	110,6	126	20, 21	1, 2, 3, 4, 5
Caso teste 4	101,5	126	20, 21	1, 2, 3, 4, 5
Caso teste 5	125,44	126	19, 20, 21	1, 2, 3, 4, 5
Caso teste 6	183,10	125	24, 25, 26, 27	1, 2, 3, 4, 5

Nos casos permanentes o campo próximo finalizava sempre na mesma coordenada local (M, N) da linha central da pluma, não acontecendo o mesmo nos casos não permanentes que apresentavam uma pequena variação. Nestes casos, a coordenada local mais frequente, em cada execução, foi utilizada como localização da fonte emissora.

⁷ Esta consideração foi realizada pois o código do acoplamento dinâmico fornecido pela Deltares realiza o lançamento da pluma na camada superior da coluna d'água, compatibilizando assim as características dos acoplamentos passivo e dinâmico.

3.2.3 Acoplamento dinâmico

O acoplamento dinâmico e *online* utilizado neste trabalho ocorreu pela implementação do algoritmo do mesmo nos códigos do módulo FLOW do Delft3D e no CORMIX foi efetuada pela Deltares em conjunto com a MixZon⁸, tendo sido o embasamento teórico do acoplamento dinâmico descrito resumidamente no item 2.4.3. Somente o código do Delft3D foi cedido para a realização deste trabalho uma vez que o CORMIX é um modelo comercial e assim sendo apenas a licença foi concedida para esta pesquisa. Este acoplamento baseia-se no método de Choi e Lee (2007) e se desenvolve conforme fluxograma apresentado na Figura 17.



* Ocorre somente uma vez no início.

Figura 17 – Fluxograma do método do acoplamento dinâmico.

A implementação do acoplamento dinâmico entre o módulo FLOW do Delft3D e o CORMIX ocorre pela passagem de dados de um modelo para o outro. O arquivo chamado

⁸ Por estar em fase de testes, este acoplamento entre o Delft3D-FLOW e o CORMIX não está incluso no pacote do *Open Source* do Delft3D.

CORINP.DAT, contém dados do ambiente e outros dados que permitem que o Delft3D-FLOW possa criar o arquivo de acoplamento com o CORMIX. Neste arquivo deve-se apresentar:

- a. O diretório onde o arquivo de acoplamento deverá ser gravado;
- b. A quantidade de emissários presentes na área modelada;
- c. A localização do difusor no corpo receptor em coordenadas locais horizontais da grade do Delft3D (M, N). No caso do difusor se apresentar como sendo uma linha de difusores, usualmente se utiliza o ponto central desta linha;
- d. A localização do ponto de onde se retiram as características hidrodinâmicas do ambiente (ponto de monitoramento) em coordenadas locais horizontais do grid do Delft3D (M, N);
- e. A localização do ponto de retirada de água do ambiente para casos onde ocorre este processo para utilização como água de resfriamento, em coordenadas locais da grade do Delft3D (M, N, K). Quando não houver retirada, atribuir valores zeros para as três coordenadas;
- f. A descarga do emissário em m^3/s ;
- g. A salinidade e a temperatura do ambiente. Se a coordenada local M do ponto de retirada de água do ambiente for igual a 0, devem ser fornecidos valores absolutos, caso contrário deve-se fornecer a diferença na salinidade e na temperatura do efluente com relação ao ambiente;
- h. Parâmetros gerais do CORMIX, como o diâmetro do difusor (D_0) (m), altura do difusor sobre o leito (h_0) (m), ângulo vertical do difusor, é formado pela linha central dos difusores e o plano horizontal (θ_0) ($^\circ$), ângulo horizontal do difusor, é o ângulo medido em sentido anti-horário entre a direção da corrente ambiente e a projeção do plano da linha central dos difusores (σ_0) ($^\circ$); e
- i. Nome do arquivo que contém o caso base do CORMIX sem a extensão CMX, juntamente com o diretório onde este arquivo está gravado.

Caso a modelagem considere mais do que um emissário realizando lançamentos simultâneos, deve-se incluir no arquivo CORINP.DAT os dados dos outros lançamentos a partir do item c. Um exemplo do arquivo CORINP.DAT é apresentado nos Apêndices deste trabalho.

No arquivo de execução do Delft3D (*Master Definition File* – MDF) devem-se acrescentar parâmetros adicionais por meio das palavras-chave **Flnfl** e **Nflmod**. Para a primeira palavra-chave, devem-se adicionar valores dos instantes de tempo, em minutos, que inicia o acoplamento, o intervalo de tempo e o que finaliza o acoplamento. Já a segunda palavra-chave indica o modelo utilizado para realizar a simulação do campo próximo, e no caso da execução de um acoplamento dinâmico deve-se utilizar o valor *#cortime#*.

Após estas definições, o modelo Delft3D-FLOW é executado de modo a gerar as características ambientais (nível d'água, velocidade e estratificação) que são retiradas de um ponto definido no arquivo CORINP.DAT, conhecido como “ponto de monitoramento” e são armazenadas no arquivo de acoplamento (*CORTIME.linking*) no formato dos arquivos de entrada para a execução do CorTIME. Estes são arquivos de comunicação entre o Delft3-FLOW e o CORMIX e apresentam as características do ambiente no ponto de monitoramento informando ao CORMIX como está o ambiente aonde será realizado o lançamento. Estes arquivos apresentam os parâmetros de execução de cada passo temporal, sendo que estes são exibidos no Quadro 1, onde os parâmetros que permanecem constantes dentro de determinada execução do CorTIME deverão aparecer como “-”.

Quadro 1 - Parâmetros do arquivo de entrada de dados para a execução do CorTIME.

#	Parâmetro	Descrição
00	TIME	Passo de tempo (s/# passo)
01	HA	Profundidade média (m)
02	HD	Profundidade da descarga (m)
03	UA	Velocidade permanente do ambiente (m/s)
04	U/S/N	Uniforme/Estratificado/Não-uniforme - <i>N somente para descargas de água de dessalinização/sedimentos</i>
05	RHOAM	Densidade uniforme do ambiente (kg/m ³) - <i>somente se Stype = A/B/C ou L1/L2/L3</i>
06	SType	Tipo de estratificação (A / B / C ou 1L / 2L / 3L) - <i>1L/2L/3L somente se for descarga de água de dessalinização/sedimentos não-uniforme (N)</i>
07	RHOAS	Densidade da superfície (kg/m ³) - <i>somente de SType = A/B/C ou L1/L2/L3</i>
08	RHOAB	Densidade do fundo (kg/m ³) - <i>somente se SType = A/B/C</i>
09	HINT	Altura da pycnoclina (m) - <i>somente se SType = B ou C</i>
10	DRHOJ	Salto de densidade (kg/m ³) - <i>somente se SType = C</i>

#	Parâmetro	Descrição
11	Q0	Vazão de saída do efluente (m ³ /s)
12	C0	Concentração do efluente (acima da concentração ambiente) Unidades iguais ao do caso base
13	RHO0	Densidade do efluente (kg/m ³)
14	GAMMA	Ângulo de alinhamento GAMMA (°)
15	SIGMA	Ângulo horizontal SIGMA (°)
16	D0	Diâmetro do orifício (m)
17	B0	Largura do canal (m) - <i>somente para casos com o CORMIX3</i>
18	H0	Altura do canal (m) - <i>somente para casos com o CORMIX3</i>
19	Polltype	Descarga de água de salinização (B) ou de sedimentos (S)
20	L1Sub	Submersão da camada1 não-uniforme (m)
21	L1Den	Densidade da camada1 não-uniforme (kg/m ³)
22	L2Sub	Submersão da camada2 não-uniforme (m)
23	L2Den	Densidade da camada2 não-uniforme (kg/m ³)
24	L3Sub	Submersão da camada3 não-uniforme (m)
25	L3Den	Densidade da camada3 não-uniforme (kg/m ³)
26	Distb	Distância da margem mais próxima (m) - <i>somente para casos com o CORMIX1</i>
27	PHI	Direção do escoamento ambiente com relação ao Norte geográfico para esse passo de tempo, medido no sentido horário a partir do Norte (°)

Fonte: Doneker e Jirka (2007), modificado pelo autor (2015).

Sob estas características ambientais o lançamento de efluentes e a posterior formação do campo próximo irá ocorrer pela execução do CORMIX. Este por sua vez é executado para simular um caso base que apresente informações sobre o difusor (tipo de difusor: um bocal ou múltiplos bocais, e neste caso a configuração dos *risers* e bocais, o comprimento da linha de difusores e a quantidade de bocais), e principalmente possibilite a execução do CorTIME.

O CorTIME deve ser executado no modo acoplado (*Coupled*), indicando-se a pasta e o nome do arquivo de acoplamento. A partir deste passo, o acoplamento ocorre automaticamente sem a necessidade da interferência do usuário até o tempo indicado no arquivo MDF pelo parâmetro adicional **Flnfl**.

A cada execução do CorTIME são gerados os arquivos de saída: PRD – *Prediction files*, SES – *Session Report*. Dentro do processo do acoplamento o Delft3D faz a leitura do arquivo

PRD (arquivo de comunicação CORMIX – Delft3D-FLOW) buscando o final do campo próximo e qual módulo do CORMIX foi utilizado para chegar a esta situação. A partir do módulo utilizado, o Delft3D retira os dados das coordenadas x , y , z da linha central do jato, que estão referenciadas ao ponto central da linha de difusores, e as transforma em coordenadas reais (UTM) escrevendo tais informações em um arquivo TEK, juntamente com os demais dados retirados do arquivo PRD, a medida vertical ocupada pelo jato (BV), a metade da largura do jato medido horizontalmente na direção y (BH) e a diluição da linha central do jato/pluma (S).

Em seguida o método DESA (*Distributed Entrainment Sink Approach*) é aplicado considerando-se as coordenadas reais em UTM do arquivo TEK, onde sumidouros (*sinks*) são aplicados ao longo da linha central do jato. O fluxo de arraste induzido pelo jato é calculado como sendo a quantidade de água retirada das células da grade sob influência do jato necessária para atingir a diluição (S)⁹ naquele determinado ponto, somando-se estas quantidades ao longo de toda a trajetória do jato no campo próximo. O resultado deste somatório configura a variável Q_s da equação (2) que somado a vazão inicial do lançamento compõe o fluxo volumétrico que entra como fonte diluída nas células da grade do campo afastado. Para se determinar as células da grade que estão sob influência do jato calculam-se as dimensões do jato a partir dos valores de BV e BH , também para cada ponto. Após todos os sumidouros terem sido aplicados, no último ponto do campo próximo, toda a água retirada anteriormente é adicionada às células da grade que circundam este ponto, ou seja, todas as células que estão, na horizontal, à uma distância BH da linha central do jato, e na vertical, à uma distância correspondente a metade superior de BV ¹⁰, garantindo assim a conservação da massa.

Atualmente, o código computacional do acoplamento está limitado a todos os módulos do CORMIX1 e somente os módulos 274 e 275 do CORMIX2, onde estes correspondem ao “*Acceleration zone of staged diffuser*” e ao “*Staged perpendicular diffuser in strong current*”, respectivamente. Estes módulos estão compreendidos dentro do grupo que descreve plumas totalmente misturadas ao longo da vertical. Outras limitações do atual código computacional consistem no fato de que: (i) a reposição da água retirada das células da grade

⁹ No atual código do acoplamento C_0 é imposto como sendo igual a 1 kg/m^3 , assim a diluição é calculada como $1/C$.

¹⁰ A utilização das células localizadas à meia camada superior de BV não é uma condição padrão do acoplamento, e sim uma condição imposta no código do acoplamento dinâmico pelos pesquisadores da Deltares para garantir melhores resultados no projeto descrito em Morelissen *et al.* (2015).

não considera a direção dominante do fluxo e é feita sem velocidade e assim sem direção, ou seja, não há adição ou retirada de quantidade de movimento; (ii) o método DESA é aplicado somente nas células da grade que contém a linha central da pluma criando um efeito sobre-estimado de redução de velocidade a montante do lançamento.

Em trabalhos anteriores o acoplamento dinâmico entre o Delft3D-FLOW e o CORMIX foi aplicado somente a situações de lançamentos de água de resfriamento com baixa e altas vazões (MORELISSEN *et al.*, 2015; MORELISSEN; van der KAAIJ; BLENINGER, 2013) onde o objetivo era a análise da distribuição de temperatura. Neste trabalho objetivou-se a análise de alterações hidrodinâmicas, desta forma a implementação deste tipo de acoplamento foi realizada para outras combinações de “escoamento ambiente-vazão do efluente”.

A implementação do acoplamento ocorreu em um domínio genérico simplificado cujas características são apresentadas a seguir, assim como as características dos casos testes utilizados na mesma. Além de testar diferentes combinações de “escoamento ambiente-vazão do efluente”, realizaram-se testes de análise de sensibilidade com relação ao tamanho das células da grade computacional, intervalo de tempo do acoplamento e também à localização do “ponto de monitoramento”, ponto de retirada das características hidrodinâmicas do ambiente.

3.3 COMPLEMENTOS

3.3.1 Domínio Genérico Simplificado

O domínio genérico simplificado foi utilizado para representar um trecho sem inclinação de um escoamento raso de grande extensão lateral que foi representado como um canal retangular de seção transversal constante com comprimento de 14900 m, largura de 3750 m e profundidade de 15 m, tendo sido discretizado em uma grade de diferenças finitas com Δx e Δy variando de 50 a 142 m e 50 a 114 m, respectivamente e 10 camadas uniformemente distribuídas na vertical¹¹. Na Figura 18 apresenta-se a visualização em planta (A), em um corte longitudinal (B) e a discretização horizontal juntamente com os contornos abertos e pontos de observação dos resultados temporais (C).

O emissário encontra-se localizado aproximadamente na metade do canal na dimensão longitudinal e mais próximo à margem direita do mesmo, sendo que a localização longi-

¹¹ Com o método utilizado no acoplamento dinâmico, a hidrodinâmica do campo afastado precisa ser representada em três dimensões.

tudinal foi escolhida para possibilitar a dispersão da pluma nas direções tanto a montante quanto a jusante, principalmente nos casos em estado não permanente. Já a escolha da localização transversal não apresentou critério específico.

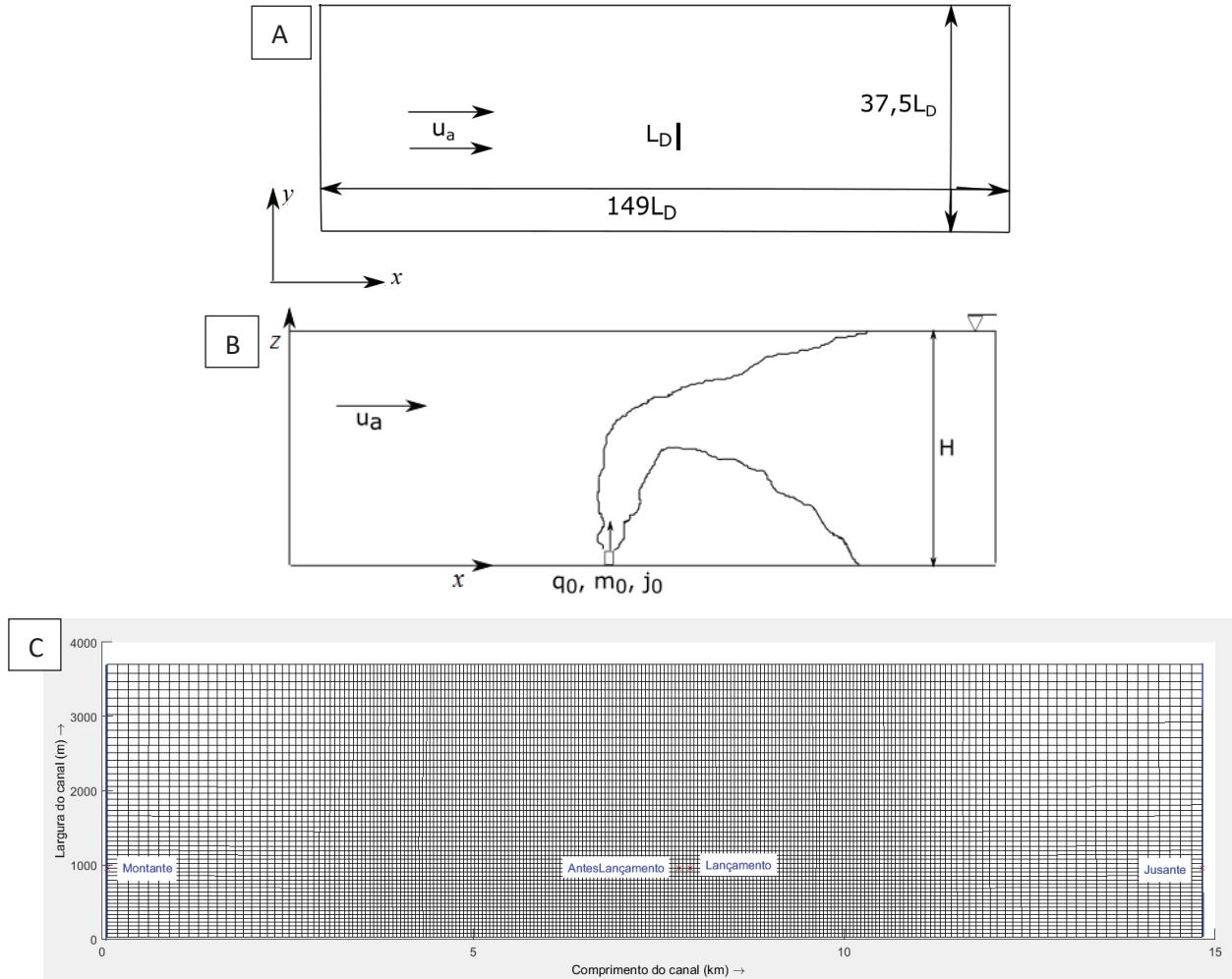


Figura 18 – Visualização do domínio simplificado: (A) em planta (x, y), (B) em um corte longitudinal (x, z) (C) discretizado com indicações dos contornos abertos (Montante e Jusante) e pontos de observação (Montante, AntesLançamento, Lançamento e Jusante).

O emissário apresenta-se perpendicular ao escoamento ambiente ($\gamma = 90^\circ$) com 1090 m de comprimento onde os 100 últimos metros constituem a linha de difusores (L_D). Cada *riser* possui dois bocais que se encontram direcionados para um mesmo ponto (*staged diffuser*), com $\beta = 0^\circ$ e a quantidade de difusores varia de acordo com a vazão do efluente. Os bocais encontram-se alinhados com a horizontal, $\theta = 0^\circ$ e perpendiculares com relação ao fluxo do ambiente ($\sigma = 90^\circ$). Uma visualização tridimensional da linha de difusores, obtida com o CorSpy do CORMIX, é apresentada na Figura 19 e o esquema de definição da configuração geométrica dos difusores pode ser observada na Figura 12.

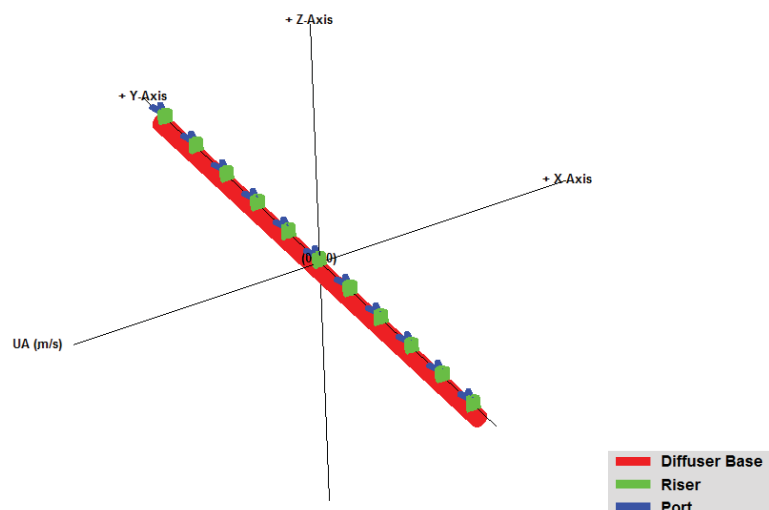


Figura 19 – Visualização tridimensional da linha de difusores utilizada nas simulações com alta vazão de efluente com $\beta = 0^\circ$, $\sigma = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$ e $\gamma = 90^\circ$.

Neste domínio foram simulados cenários variando-se as condições de contorno e a vazão dos efluentes lançados de modo a modificar a relação “escoamento ambiente – vazão do efluente” e, por se tratar de uma metodologia em fase de testes foram necessárias várias execuções com modificações de outros parâmetros do módulo FLOW e também do acoplamento para primeiro conseguir que o acoplamento dinâmico ocorresse, depois para se obter resultados hidrodinâmicos coerentes com a literatura no aspecto da hidrodinâmica ambiente sofrer pequenas alterações por lançamentos de baixa vazão.

Após a obtenção de resultados coerentes, foram executados casos em regime permanentes conforme a Tabela 4 e um caso em regime não permanente. Em todos os casos testes simulou-se o lançamento de efluentes com flutuabilidade positiva.

Tabela 4 – Dados de entrada utilizados nos casos testes dos acoplamentos nulo, passivo e dinâmico aplicados ao domínio simplificado em casos permanentes simulando o lançamento de efluentes com flutuabilidade positiva em água do mar.

	Caso Teste 1		Caso Teste 2		Caso Teste 3		Caso Teste 4		Caso Teste 5		Caso Teste 6	
	Ambiente	Efluente	Ambiente	Efluente	Ambiente	Efluente	Ambiente	Efluente	Ambiente	Efluente	Ambiente	Efluente
$T(^{\circ}\text{C})$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
S (ups)	34	0,001	34	0,001	34	0,001	34	0,001	34	0,001	34	0,001
Q (m ³ /s)	56250	3,9	14062,5	3,9	6357	3,9	56250	40	14062,5	40	6357	40
u (m/s)	1,0	2,35	0,25	2,35	0,11	2,35	1,0	2,5	0,25	2,5	0,11	2,5
ρ (kg/m ³)	1024	998,21	1024	998,21	1024	998,21	1024	998,21	1024	998,21	1024	998,21

* os valores de velocidade apresentados referem-se à velocidade promediada na vertical.

Nos testes dos casos em regime permanente as condições de contorno eram à Montante: vazão total (*Total discharge*) em séries temporais das vazões apresentadas na Tabela 4 com perfil vertical logarítmico de velocidade, e à Jusante: nível d’água em séries temporais

com valor igual 0 metros. O valor de vazão de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ escolhido para os casos testes de baixa vazão de efluentes corresponde a vazão de projeto do emissário submarino de Cartagena, sendo também um valor similar à média das vazões dos emissários em operação no Brasil (BAPTISTELLI, 2008) e para os casos testes de alta vazão de efluentes escolheu-se uma vazão uma ordem de grandeza maior representando assim um lançamento industrial ou de águas de resfriamento (MORELISSEN *et al.*, 2015), porém mantendo a diferença de densidade igual para meios de comparação. Os valores das vazões do ambiente foram escolhidos para contemplar diferentes relações entre o escoamento ambiente e o lançamento de efluentes.

As condições de contorno para a temperatura, a salinidade e o traçador (concentração do efluente) eram iguais a 20°C , 34 ups e $0 \text{ kg}/\text{m}^3$, respectivamente, tanto para as condições à montante e à jusante.

Para todos os casos testes considerou-se o ambiente apresentando o coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal igual $1 \text{ m}^2/\text{s}$ e os coeficientes de viscosidade turbulenta vertical, difusividade turbulenta horizontal e vertical iguais a $0 \text{ m}^2/\text{s}$. Para o fechamento da turbulência foi utilizado o modelo $k - \varepsilon$, modelo de turbulência de segunda ordem, que tem o coeficiente de energia cinética turbulenta (k) e o coeficiente de dissipação cinética turbulenta (ε) definidos pela equação de transporte. A partir destes coeficientes define-se o comprimento de mistura característico e o coeficiente de viscosidade vertical turbulento. O coeficiente de difusividade turbulenta é obtido do coeficiente de viscosidade.

Primeiramente apenas o Delft3D é executado com partida fria até a obtenção de um campo de velocidades em regime permanente (base de comparação) para depois executar o mesmo modelo, com partida quente, efetuando o lançamento de efluentes e modelando-o com o acoplamento nulo e passivo. Para o acoplamento dinâmico executa-se o CORMIX e o Delft3D seguindo o método apresentado na Figura 17.

De modo a se obter velocidades de saída dos difusores consistentes com a realidade, menores que $5 \text{ m}/\text{s}$, os emissários utilizados nos casos testes apresentavam quantidade de bocais e o diâmetro dos mesmos diferenciados para os casos de lançamento com alta e baixa vazão. Para os lançamentos com baixa vazão foram utilizados 10 bocais de $0,46 \text{ m}$ de diâmetro enquanto para os lançamentos de alta vazão foram utilizados 22 bocais de $0,96 \text{ m}$ de diâmetro. O ponto central da linha de difusores, igual para todos os casos testes, localizava-se nas coordenadas locais $M=124$ e $N=20$, correspondendo a coordenadas globais $x=7928 \text{ m}$ e $y=967 \text{ m}$, a $1,0 \text{ m}$ do leito do canal ($K = 10$), no ponto onde também foi imposto o ponto de

gravação dos resultados temporais *Lançamento* conforme mostra a Figura 18, porém o ponto de lançamento de efluentes (inserção da fonte) variou de acordo com o tipo de acoplamento e do caso teste. No acoplamento nulo a fonte localizava-se, para todos os testes, no ponto central da linha de difusores, no acoplamento passivo as fontes localizavam-se conforme apresentado na Tabela 3 e, no acoplamento dinâmico a fonte ocupava a meia camada superior da coluna d'água e a largura da pluma ao final do campo próximo, tendo como ponto central da pluma as coordenadas $M = 126$ ($x = 8028$ m) e $N = 20$ ($y = 967$ m) nos casos testes de 1 a 5 e $M = 125$ ($x = 7978$ m) e $N = 25$ ($y = 1217$ m) no caso teste 6.

Ainda para a categoria dos testes em regime permanente, o Caso Teste 1 do acoplamento dinâmico foi executado em uma grade mais refinada, com Δx e Δy variando de 25 a 71 m e 25 a 57 m, respectivamente, e em uma grade mais grosseira, com Δx variando de 100 a 284 m e Δy variando de 100 a 228 m.

Além da verificação da sensibilidade do acoplamento à resolução da grade, também foi analisada a sensibilidade deste método frente à escolha da localização do ponto de monitoramento (ponto de retirada dos dados ambientais) e do intervalo de tempo entre a execução dos modelos (passo de tempo do acoplamento). Sendo estes também os aspectos analisados para o caso em regime não permanente.

A localização do ponto de monitoramento é importante pois ele é ponto de comunicação entre o Delft3D-FLOW e o CORMIX. Se ele estiver muito afastado do lançamento em uma área que não é afetada pelo mesmo, o acoplamento dinâmico funcionará em parte como um acoplamento passivo, onde lançamento ocorre sempre em um corpo receptor sem alterações, “limpo”; e se for muito próximo, na área onde o campo próximo ocorre, as modificações são muito bruscas e o acoplamento dinâmico pode gerar resultados fisicamente impossíveis.

A análise da sensibilidade do acoplamento dinâmico frente ao intervalo de tempo do acoplamento foi realizada mediante a execução da metodologia utilizando 15, 30, 45 e 180 minutos de passo de tempo, ou seja, a cada intervalo de tempo o CORMIX era executado com dados ambientais atualizados.

Para o caso em regime não permanente as condições de contorno impostas à Montante foram do tipo corrente harmônica com perfil vertical logarítmico e à Jusante nível

d'água harmônico, tendo os dados apresentados na Tabela 5 tanto para montante quanto para jusante.

Tabela 5 – Condições de fluxo impostas como condição de contorno à montante e à jusante no regime não permanente.

	Frequência (°/h)	Amplitude início	Fase início (°)	Amplitude final	Fase final (°)
Montante	0	0,5 m/s	0	0,5 m/s	0
	30	0,5 m/s	0	0,5 m/s	0
Jusante	0	0 m	0	0 m	0
	30	0 m	0	0 m	0

Para este teste foram obtidos o campo de velocidades do canal na situação sem o lançamento (base de comparação), com acoplamento nulo, passivo e dinâmico. Para as situações com lançamento foram simulados cenários com emissários de baixa (3,9 m³/s) e alta vazão (40 m³/s) de efluentes sendo verificada principalmente a sensibilidade à escolha do ponto de monitoramento para a realização do acoplamento.

Por se tratar de uma situação não permanente todas as formas de acoplamento foram executadas por 2880 minutos (2 dias) após o período de aquecimento do módulo FLOW do Delft3D, sendo que o acoplamento dinâmico iniciava o lançamento em 150 minutos e com intervalo de tempo de acoplamento de 30 minutos. Este intervalo foi utilizado inicialmente como padrão e posteriormente alterado para 15, 45, 90 e 180 minutos para ver a sua influência no acoplamento. Todas as alterações foram executadas com lançamentos de baixa e alta vazão de efluentes.

3.3.2 Análise das Alterações Hidrodinâmicas

Para analisar as alterações hidrodinâmicas no escoamento ambiente geradas pela hidrodinâmica do campo próximo primeiramente foram geradas as velocidades do escoamento ambiente sem o lançamento (base de comparação), para as situações de alta, média e baixa velocidade do ambiente, 1 m/s, 0,25 m/s e 0,11 m/s, respectivamente.

As velocidades obtidas com os lançamentos de baixa e alta vazão em cada um dos escoamentos ambientes caracterizam os casos testes de acordo com o esquema apresentado na Figura 20, sendo estes casos testes simulados com os diferentes tipos de acoplamento. Posteriormente as velocidades induzidas promediadas na vertical foram determinadas a partir da diferença absoluta entre as velocidades promediadas na vertical obtidas com os lançamentos e os diferentes acoplamentos e as velocidades da base de comparação.

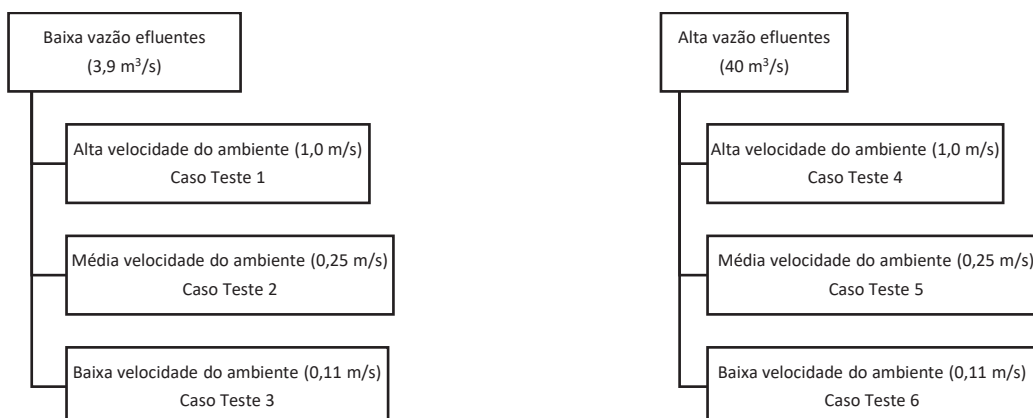


Figura 20 – Esquema de caracterização dos Casos Testes baseados na combinação escoamento ambiente – vazão do efluente.

O cálculo das áreas com velocidades induzidas foi realizado a partir da aplicação de uma rotina desenvolvida no MatLab às velocidades induzidas promediadas na vertical e também às velocidades das camadas de superfície, do meio e de fundo obtidas para cada caso teste e com os diferentes tipos de acoplamento. Foram determinadas áreas com velocidades induzidas maiores do que 1, 5 e 10% da velocidade média da base de comparação de cada escoamento ambiente para o caso da análise das velocidades induzidas promediadas na vertical e maiores do que 1, 5 e 10% da velocidade média das camadas de interesse da base de comparação para o caso da análise por camadas.

3.3.3 Critérios para o Estabelecimento do Tipo de Acoplamento

O estabelecimento de critérios baseados em escalas características possibilita a definição do tipo de acoplamento mais apropriado a ser utilizado antes da execução dos modelos. Com este objetivo o critério da instabilidade do campo próximo, o critério da quantidade de movimento distribuída ao longo da profundidade e o critério de Froude (item 2.5) foram aplicados aos casos testes e os resultados foram comparados com as áreas de velocidade induzida.

A partir da comparação foi possível avaliar se houve uma coerência entre os resultados dos critérios com as alterações hidrodinâmicas geradas pelos lançamentos submetidos aos distintos tipos de acoplamento, sua significância (intensidade) e a extensão espacial das alterações.

3.3.4 Análise da Dispersão

Os estudos envolvendo o lançamento de efluentes via emissários submarinos ou subfluviais usualmente objetivam a análise da dispersão dos efluentes, das diluições e da quali-

dade da água. E, como este trabalho objetivou a análise das alterações hidrodinâmicas no campo afastado geradas pela hidrodinâmica do campo próximo foram realizadas simulações de transporte de traçadores conservativos nos casos testes permanentes para avaliar a coerência entre os resultados hidrodinâmicos e a dispersão dos efluentes lançados.

A dispersão dos efluentes foi analisada sob a perspectiva Euleriana e a Lagrangeana.

3.3.4.1 Abordagem Euleriana

A dispersão dos efluentes com a abordagem Euleriana foi realizada no Delft3D-FLOW independente do tipo de acoplamento, a partir da inclusão dos constituintes “Poluentes e traçadores” dentro do item Processos, que faz com que o módulo FLOW os considere nas simulações.

Para o acoplamento passivo, além da inclusão citada acima se adicionou o lançamento dos efluentes conforme explicado no item 3.2.2, fornecendo-se a vazão de cada fonte e a concentração do efluente ao final do campo próximo para cada caso teste, sendo este valor fornecido pelo CORMIX. A vazão de cada fonte corresponde a vazão do caso teste em questão, dividido pela quantidade de fontes que é determinada dividindo a largura da pluma ao final do campo próximo (ver Tabela 3) pelo tamanho da célula da grade. Na Figura 21 apresenta-se uma representação da forma como as fontes são inseridas no campo afastado.

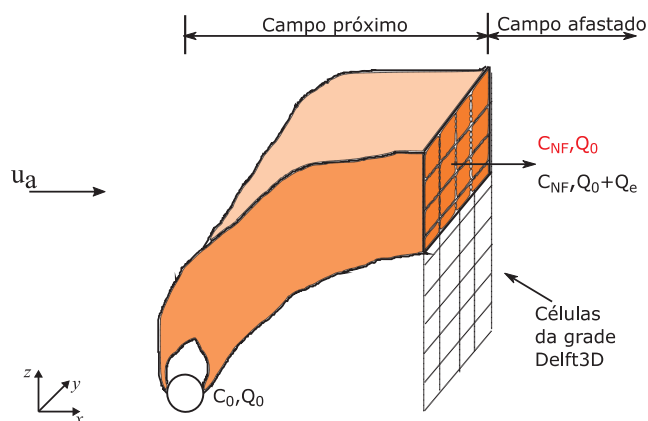


Figura 21 – Representação do lançamento dos efluentes, com abordagem Euleriana, para a simulação da dispersão de um traçador conservativo gerado pelo acoplamento passivo (em vermelho, C_{NF} = concentração do traçador ao final do campo próximo, Q_0 = vazão de lançamento) e pelo acoplamento dinâmico (em preto, C_{NF} , Q_0 , Q_E = vazão de diluição).

Para o acoplamento dinâmico a concentração do traçador é inserida, nas simulações pelo algoritmo do acoplamento dinâmico, nas células da grade do Delft3D que compõe a área da seção transversal ocupada pela pluma ao final do campo próximo juntamente com a vazão de lançamento do mesmo mais a vazão de diluição.

Após a obtenção da distribuição das concentrações para cada caso teste com os diferentes tipos de acoplamento determinou-se as concentrações induzidas promediadas na vertical e a partir destas foram determinadas as porcentagens da área do canal com concentração promediadas na vertical induzida de 25, 37, 50 e 75% da concentração promediada na vertical máxima induzida.

3.3.4.2 Abordagem Lagrangeana

O módulo Delft3D-PART foi utilizado para realizar a dispersão do traçador conservativo com a abordagem Lagrangeana, onde a distribuição de concentrações promediadas na vertical foi determinada para cada caso teste com o acoplamento passivo e dinâmico.

Na execução do Delft3D-PART, primeiramente os resultados hidrodinâmicos são agregados como dado de entrada para posteriormente serem fornecidos os demais dados necessários para caracterizar as simulações.

Em todas as simulações as fontes apresentavam a concentração do traçador ao final do campo próximo fornecida pelo CORMIX sendo dispostas de forma a representar aproximadamente a área da pluma na seção transversal neste instante ($=2 \cdot BH$), onde a quantidade de fontes utilizadas em cada caso teste era obtida pela relação entre área da pluma e o raio de atuação¹² de cada fonte (Figura 22). Como o lançamento foi realizado na camada superior da coluna d'água, os centros das fontes localizavam-se a uma profundidade de 3,75m da superfície com 3,75m de raio.

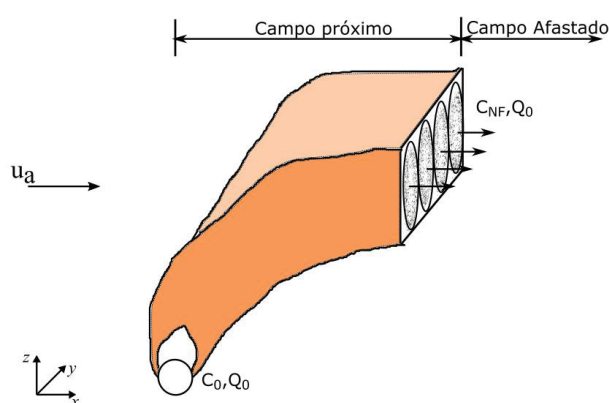


Figura 22 – Representação do lançamento de efluentes, com abordagem Lagrangeana, para a simulação da dispersão de um traçador conservativo gerado pelos acoplamentos passivo e dinâmico (C_{NF} = concentração do traçador ao final do campo próximo, Q_0 = vazão de lançamento).

¹² O raio de atuação da fonte define um círculo que permite simular o espalhamento inicial de cada fonte, onde as partículas são posicionadas inicialmente de modo aleatório dentro deste círculo

Para o acoplamento passivo a vazão imposta de cada fonte ao final do campo próximo era a mesma do lançamento em cada caso teste, representando assim fontes não diluídas.

O total de partículas lançadas em cada simulação, 27000, foi igual para todos os testes, assim como o coeficiente de dispersão vertical que foi considerado constante para todo o domínio e igual a $0,001 \text{ m}^2/\text{s}$. Este valor foi imposto para garantir que as partículas ficassem mais restritas à meia camada superior do canal seguindo a hidrodinâmica obtida com os acoplamentos passivo e dinâmico. O percentual de partículas lançadas por fonte foi correspondente ao número de fontes de cada simulação.

A execução do Delft3D-PART gerou resultados de distribuição de concentrações tridimensionais e estas foram promediadas na vertical para posteriormente serem calculadas as porcentagens da área do canal com concentrações induzidas de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima induzida da mesma forma que foi realizado na abordagem Euleriana.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a implementação dos acoplamentos dinâmico, passivo e nulo, as execuções dos testes para os casos permanentes e não permanentes no domínio simplificado geraram resultados que são apresentados a seguir. Em todos os casos a análise objetiva investigar as alterações hidrodinâmicas no campo afastado induzidas pelo campo próximo.

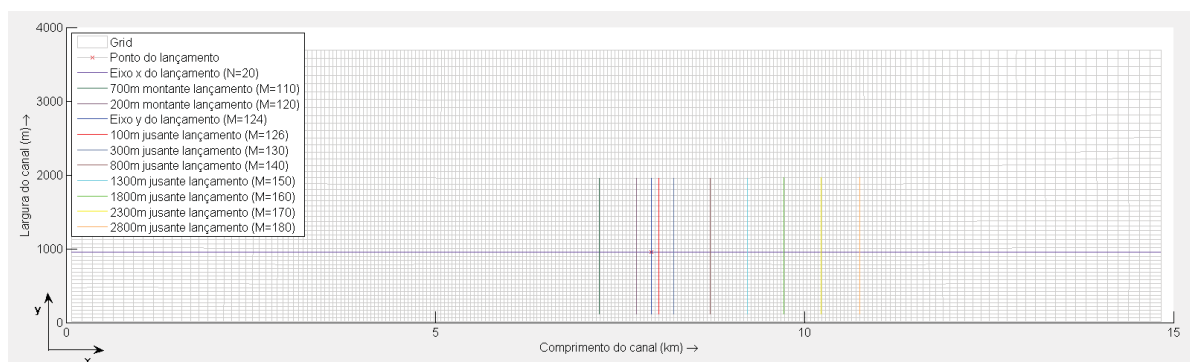


Figura 23 – Diagrama de definição dos locais aonde são apresentados os resultados espaciais: ponto de lançamento, eixo x e y do ponto de lançamento, trechos de seções transversais sob influência do lançamento.

Os resultados espaciais são apresentados como campo de velocidades em planta (x , y), seção longitudinal (x , z) e seção transversal (y , z) com vetores sobrepostos na região que sofre influência do lançamento e perfis verticais de velocidade e densidade ao longo do eixo x de lançamento nos trechos de seções transversais definidos na Figura 23.

Para a grade refinada e para a mais grosseira as seções da Figura 23 tiveram seus números alterados, porém se mantiveram as distâncias relativas ao ponto de lançamento, conforme se mostra no Quadro 2.

Quadro 2 – Localização e definição das seções transversais utilizadas nos resultados espaciais para a grade normal, mais refinada e mais grosseira.

Localização da seção transversal	Número da seção transversal (M)		
	Grade normal	Grade refinada	Grade grosseira
700 m a montante do lançamento	110	218	56
200 m a montante do lançamento	120	238	61
Ponto de lançamento	124	246	63
100 m a jusante do lançamento	126	250	64
300 m a jusante do lançamento	130	258	66
800 m a jusante do lançamento	140	278	71
1300 m a jusante do lançamento	150	298	76
1800 m a jusante do lançamento	160	318	81
2300 m a jusante do lançamento	170	338	86

Baseado na discretização espacial gerada para a grade normal, refinada e grosseira foram obtidos valores do Número de Courant¹³ variando de 8,09 a 20,52 para os três tipos de grade pois os passos de tempo eram diretamente proporcionais à dimensão das células da grade, sendo iguais a 15, 30 e 60 segundos, respectivamente para as grades refinada, normal e grosseira. Apesar de valores altos de Courant (maiores do que 10), os resultados mostraram-se coerentes demonstrando que o esquema numérico utilizado pelo Delft3D é robusto e computacionalmente eficiente. Uma descrição mais detalhada do esquema numérico é apresentada em DELTARES (2011).

4.1 ESTUDO DE CASOS EM REGIME PERMANENTE

4.2 CONFORME APRESENTADO NO COMPLEMENTOS

Domínio Genérico Simplificado (item 3.3.1), na Tabela 5, o campo de velocidades do escoamento ambiente apresenta perfil vertical logarítmico com velocidades variando de acordo com a vazão imposta na condição de contorno à montante, e as alterações induzidas pelo campo próximo eram função da relação u_0/u_a , com u_0 sendo a velocidade de saída dos difusores e u_a a velocidade do ambiente, ambas em m/s.

De modo a possibilitar a análise das alterações do campo de velocidades, primeiramente é apresentado a hidrodinâmica ambiente sem o lançamento de efluentes (base de comparação) para depois apresentar os campos de velocidade obtidos a partir do acoplamento nulo, passivo e dinâmico para cada caso teste realizado.

O escoamento ambiente é apresentado no formato de campo de velocidades em planta (x, y), em seções longitudinais (x, z) e transversais (y, z) com vetores velocidade na região de maior influência do lançamento sobrepostos ao campo de velocidades, e além da diferença entre as circulações hidrodinâmicas obtidas pelos acoplamentos e a base de comparação.

No acoplamento nulo e passivo a alteração na velocidade ocorre devido a inclusão da carga de efluente ou fluxo de massa (kg/s) por meio da introdução de uma vazão do efluente (m^3/s) e uma concentração do mesmo (kg/m^3) de modo concentrado em um ponto ou distribuído ao longo da área ocupada pela pluma ao final do campo próximo (Tabela 3), respec-

¹³ O número de Courant é definido como sendo igual a $CFL = 2\Delta x \sqrt{gH} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}$, (DELTARES, 2011).

tivamente. Para o modelo esta adição é interpretada como sendo um objeto que obstrui ou dificulta a passagem normal do fluxo, havendo assim uma diminuição do fluxo ambiente a jusante do objeto formando uma região de sombra.

Os resultados destes dois tipos de acoplamento são muito semelhantes, apresentando pequenas diferenças causadas pela forma que o lançamento é realizado em cada um destes acoplamentos. Desta forma, na sequência são apresentados somente os resultados obtidos com o acoplamento passivo, por ser este o tipo de acoplamento mais aplicado na simulação de jatos e plumas.

No acoplamento dinâmico a circulação hidrodinâmica resultante é apresentada como resultado da aplicação das características “escoamento ambiente – vazão do efluente” disposto na Tabela 4.

4.2.1 Base de comparação

Para a situação sem o lançamento apresenta-se o perfil vertical dos componentes horizontais do vetor velocidade (velocidades horizontais) para os pontos de observação dos resultados temporais (Figura 24A), os perfis verticais de densidade para as seções transversais $M=120$, 124 , 126 e 130 (Figura 24B), as velocidades promediadas na vertical vistas em planta (plano xy) (Figura 25), as velocidades em um corte longitudinal (plano xz) no eixo que contém o ponto de lançamento ($N=20$) desde $M=120$ até $M=150$ (Figura 26), e as velocidades em um corte transversal (plano yz) na seção transversal que contém o ponto de lançamento ($M=124$) (Figura 27).

Estes resultados foram obtidos a partir da execução do Delft3D com a imposição da vazão de $56250 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponde à base de comparação dos Casos Teste 1 e 4. Para os outros casos testes os resultados eram semelhantes apenas com variação nos valores das velocidades horizontais. A velocidade variou entre $0,18$ a $0,28 \text{ m/s}$ para o Caso Teste 2 e 5, e $0,085$ a $0,125 \text{ m/s}$ para o Caso Teste 3 e 6. O perfil vertical de densidade não apresenta diferenças de valores nos testes executados para a situação sem o lançamento.

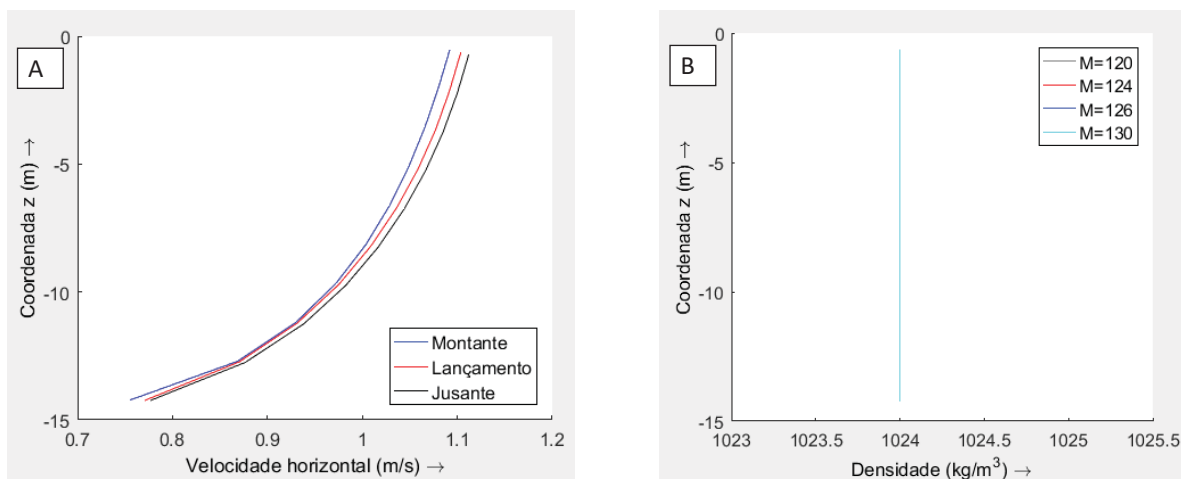


Figura 24 – Resultados na situação sem lançamentos (base de comparação): (A) Perfis verticais de velocidades para os pontos de observação: Montante, Lançamento e Jusante, com a vazão de $56250 \text{ m}^3/\text{s}$; (B) perfis verticais de densidade nas seções transversais $M = 120, 124, 126$ e 130 .

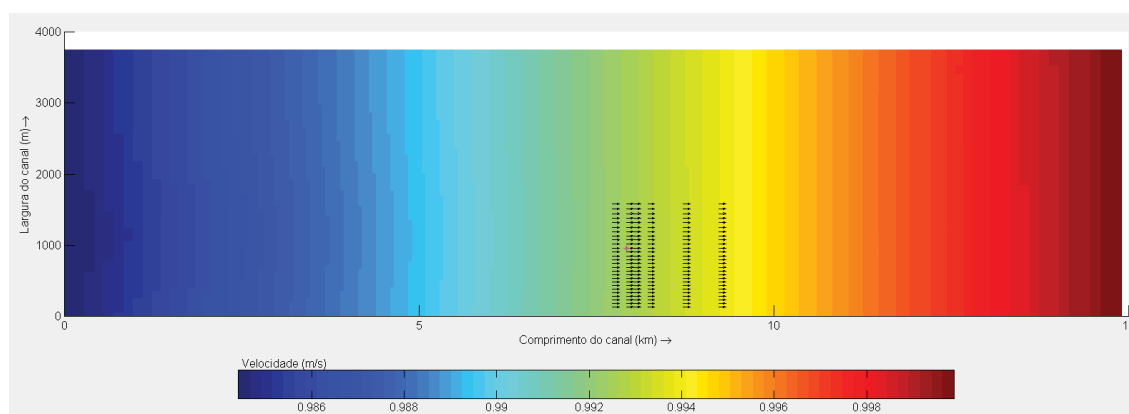


Figura 25 - Velocidades promediadas na vertical na situação sem lançamentos (base de comparação), com campo vetorial sobreposto nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140$ e 150 , onde * indica o ponto de lançamento. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy. Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$.

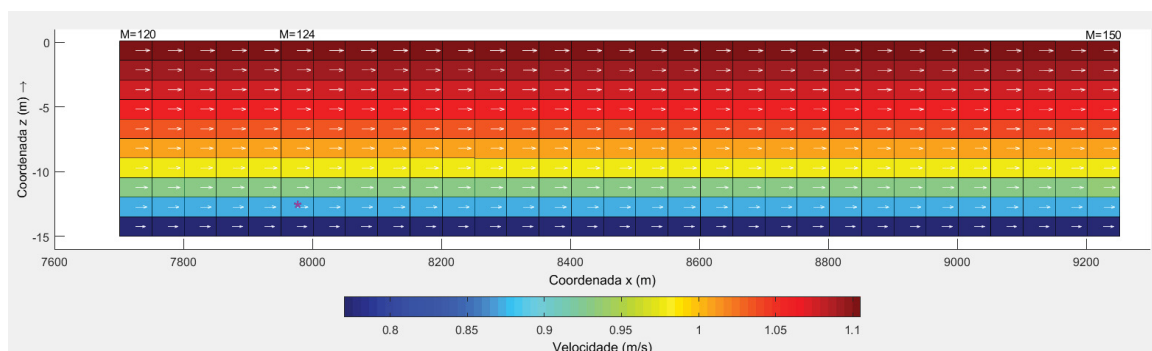


Figura 26 - Velocidades da seção longitudinal que contém o ponto de lançamento (*) desde 200 m a montante do lançamento ($M=120$) até 1300 m a jusante ($M=150$), com campo vetorial sobreposto. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: $1 \text{ m/s} = 20 \text{ m}$ e escala vertical: 20 vezes maior.

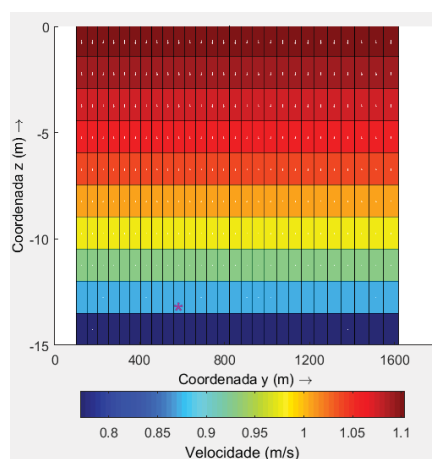


Figura 27 – Velocidades da seção transversal que contém o ponto de lançamento (*) com campo vetorial sobreposto. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano yz. Escala horizontal: 1 m/s = 10000 m e escala vertical: 100 vezes maior.

4.2.2 Caso teste 1

Neste teste, aplicado ao domínio genérico simplificado, simulou-se um lançamento de efluentes domésticos com vazão de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ em um ambiente que apresentasse uma velocidade média de 1 m/s.

4.2.2.1 Acoplamento nulo e passivo

A seguir são apresentados somente os campos de velocidades da superfície para representar as alterações induzidas pelo acoplamento passivo, já que as demais camadas não apresentaram características distintas, além das magnitudes.

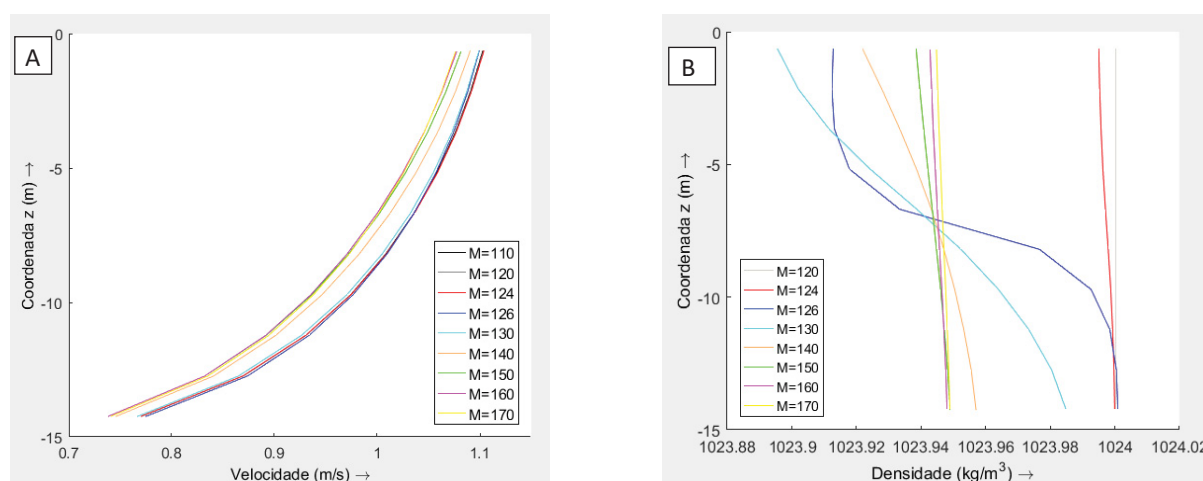


Figura 28 – Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo longitudinal passando o ponto de lançamento ($M=126$, $N=20$) nas seções transversais $M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 para o caso teste 1 com acoplamento passivo.

Os perfis verticais de velocidade (Figura 28A) ao longo das seções transversais da região que está sob maior influência do aporte dos efluentes demonstram que o mesmo induz

somente pequenas alterações nas velocidades a partir de 700 m a jusante do lançamento, não alterando o perfil logarítmico imposto na condição de contorno. Essa distância é calculada considerando-se que as seções transversais estão distanciadas em 50 m e, como o lançamento ocorre em M=126 (acoplamento passivo) e M=124 (acoplamento nulo), a seção M=140 localiza-se a 700 m a jusante do lançamento para o acoplamento passivo.

Os perfis verticais de densidade (Figura 28B) são suavemente alterados apresentando gradientes inferiores a $0,1 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m}$, o que não é considerado como estratificação do ambiente. Verifica-se que em M=126 e M=130, seção que contém o ponto de lançamento e seção a 200 m a jusante da entrada dos efluentes, respectivamente, os perfis de densidade apresentam as maiores alterações.

Na Figura 29 visualiza-se o escoamento ambiente com as pequenas alterações induzidas pelo lançamento, cuja magnitude é observada na Figura 30. Verifica-se que devido a dominância da velocidade do escoamento ambiente o lançamento não altera os vetores que permanecem da mesma forma da base de comparação.

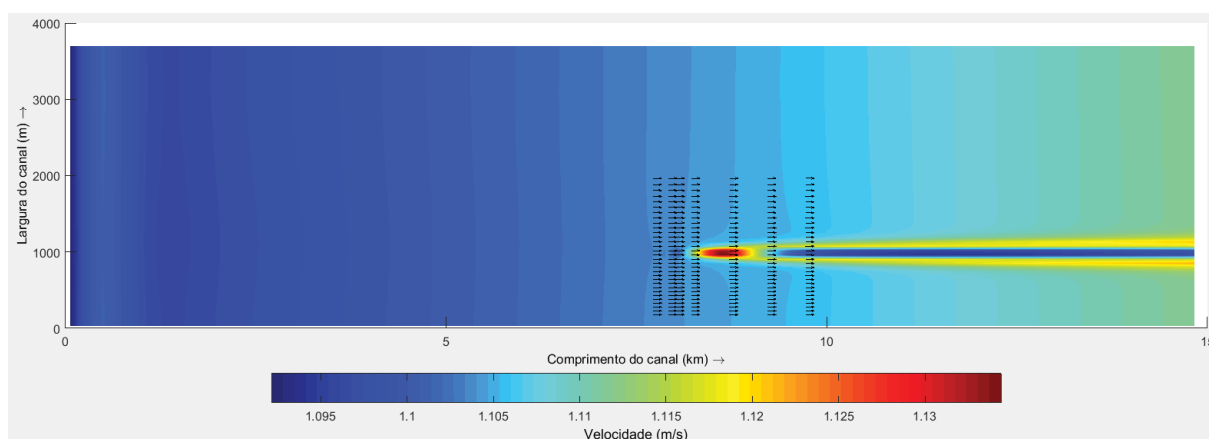


Figura 29 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Caso Teste 1) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=120, 124, 126, 130, 140, 150 e 160. Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$.

Apresenta-se também o campo de velocidades obtido da diferença entre o acoplamento passivo e a base de comparação (Figura 30). Os valores das diferenças são fornecidos em valores absolutos apresentando diferenças máximas na ordem de 10^{-2} m/s e estas pequenas diferenças são observadas até o final do canal.

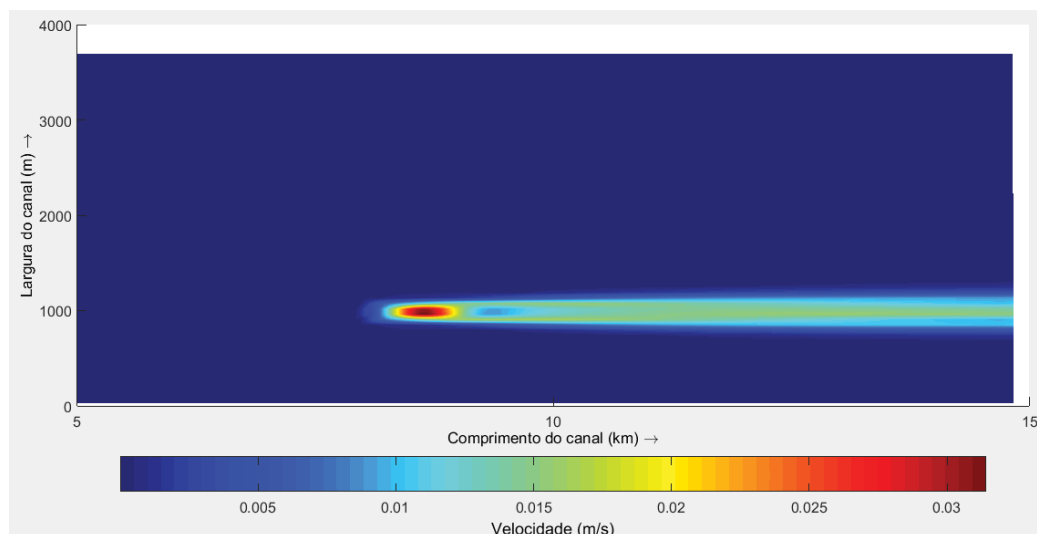


Figura 30 - Diferença entre as velocidades da base de comparação e as velocidades do caso teste 1 na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento passivo.

4.2.2.2 Acoplamento dinâmico

Com o acoplamento dinâmico os perfis verticais de densidade sofrem alterações da ordem de grandeza de 10^{-2} (Figura 31B) por ser um pequeno aporte, e desta forma é incorporado rapidamente pelo escoamento ambiente retornando ao perfil vertical de densidade uniforme, conforme o esperado. Nota-se que as alterações nos perfis de densidade ocorrem em $M=126$, tanto com o acoplamento passivo como com o acoplamento dinâmico com perfis de duas camadas, porém no primeiro o perfil corresponde a estratificação Tipo B¹⁴ do CORMIX (Figura 28B), enquanto que no segundo a estratificação é do Tipo D¹⁵ (Figura 31B).

Observando-se os perfis verticais de velocidade na Figura 31A, é possível verificar que a simulação do lançamento com a utilização do acoplamento dinâmico altera as velocidades ao longo da vertical, o que não ocorre com o acoplamento nulo ou passivo (Figura 28A). As seções transversais $M = 110$ e $M = 120$ precedem o lançamento e apresentam perfil vertical logarítmico conforme imposto pela condição de contorno a montante. Em $M = 124$ localiza-se o ponto central do emissário e a presença do jato nesta seção faz com que haja um pequeno aumento da velocidade por conta da quantidade de movimento possuída pelo jato. Devido a inclusão de sumidouros ao longo do jato que retiram a água do escoamento ambiente para diluir o efluente lançado e, posterior adição de toda a água retirada, via inclusão

¹⁴ A estratificação do Tipo B do CORMIX é definida por apresentar uma camada superior com densidade uniforme, uma súbita alteração de densidade em um nível intermediário (picnoclina) e uma camada inferior também com densidade uniforme. Há a presença de um degrau nos valores de densidade.

¹⁵ A estratificação do Tipo D do CORMIX é definida por apresentar uma camada superior com densidade uniforme e em um nível intermediário, a densidade começa a variar linearmente até atingir o valor de densidade do fundo do canal.

de fontes no escoamento ambiente, ao final do campo próximo há uma redução da velocidade. Os sumidouros são representados pelo sinal (-) e as fontes pelo sinal (+) na Figura 32. Este comportamento é observado no perfil M=126 na Figura 31, seção aonde ocorre o final do campo próximo, assim como na Figura 32 que retrata o comportamento numérico esperado do jato submetido à metodologia DESA apresentado em Lee e Choi (2007).

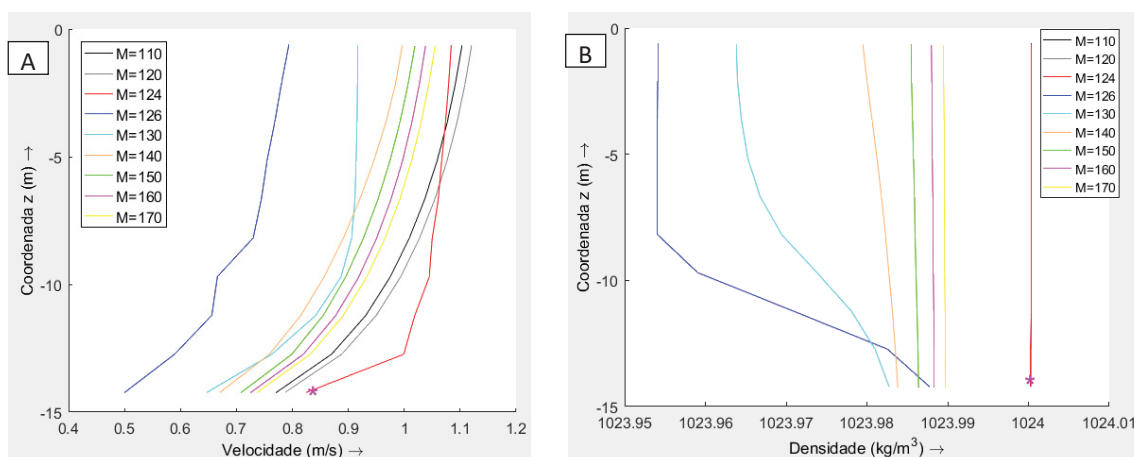


Figura 31 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170 para o caso teste 1 para o acoplamento dinâmico. O local do lançamento está indicado por (*).

A redução da velocidade ao final do campo próximo ocorre devido ao fato de que a água adicionada pelas fontes é feita somente pela inclusão de massa com velocidade igual a 0, e esta adição não é direcionada para o seguir o fluxo do escoamento ambiente, desta forma escoar em todas as direções horizontalmente, inclusive em contra fluxo.

Esta redução ainda é sentida a 300 m a jusante do lançamento (M = 130), e o efeito do lançamento sobre escoamento ambiente torna-se menos influente a partir de 800 m (M = 140), onde o perfil vertical logarítmico volta a representar o perfil vertical de velocidades. Estes resultados se mostram coerentes com os resultados apresentados pelo CORMIX, uma vez que a fase de espalhamento horizontal devido a flutuabilidade finaliza a aproximadamente 985 m a jusante do lançamento, momento a partir do qual os processos que caracterizam o campo intermediário ficam menores os processos de transporte e dispersão do campo afastado.

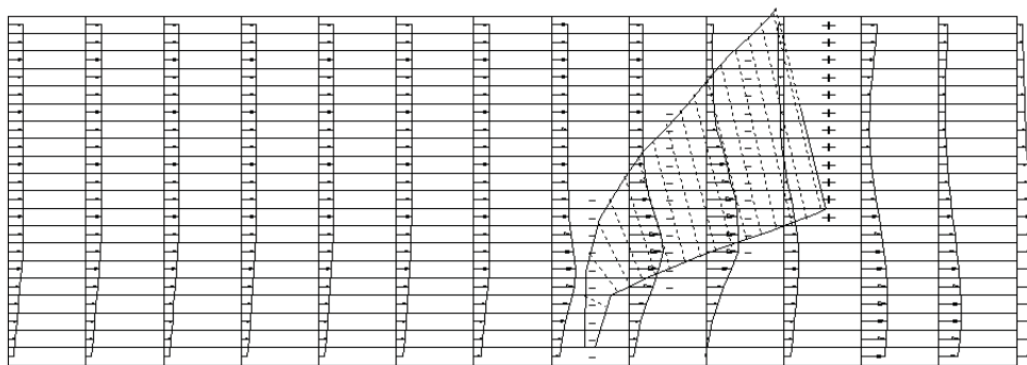


Figura 32 – Pluma simulada apresentando fontes (+) e sumidouros (-) no modelo de campo afastado para uma descarga vertical de efluentes em um ambiente sujeito uma forte velocidade transversal.

Fonte: Lee e Choi (2007).

Como a velocidade do escoamento ambiente é alta esta domina os processos decorrentes do lançamento pelo emissário, de modo que as modificações observadas são similares ao longo da vertical. Desta forma, apresenta-se na Figura 33 a diferença entre as velocidades da base de comparação e as velocidades obtidas com acoplamento dinâmico (velocidades induzidas) geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ somente na camada de superfície.

Analisando-se as velocidades induzidas nota-se que o lançamento gera alterações no campo afastado, porém, de modo geral a influência do lançamento é bastante localizada, conforme o esperado, por se tratar de uma pequena vazão de efluentes dispostos um ambiente com alta velocidade. Esta velocidade do ambiente não permite que a pluma se espalhe lateralmente.

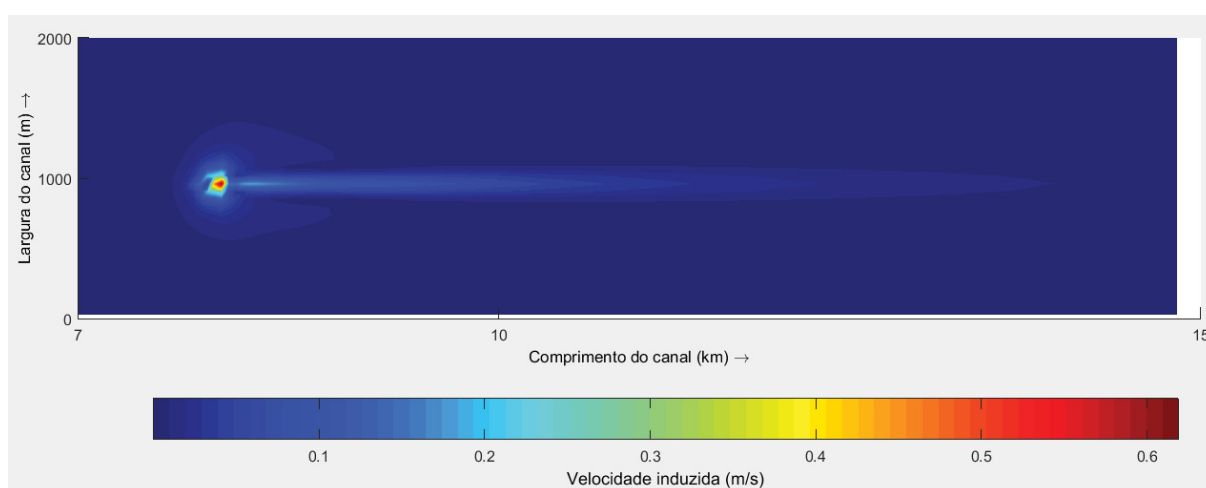


Figura 33 - Diferença entre as velocidades da base de comparação e as velocidades do caso teste 1 na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento dinâmico.

4.2.3 Caso teste 2

Neste caso teste um lançamento de baixa vazão de efluentes, $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$, é efetuado em um ambiente cuja velocidade do escoamento de $0,25 \text{ m/s}$ é quatro vezes menor do que a velocidade do caso teste 1.

4.2.3.1 Acoplamento nulo e passivo

A diminuição da velocidade do escoamento ambiente gera alterações nos perfis verticais de velocidade e densidade pela diminuição da dominância da quantidade de movimento do fluxo ambiente. Com velocidades menores o lançamento consegue gerar mais alterações na hidrodinâmica do ambiente. Na seção, $M=126$, aonde ocorre o lançamento observa-se a redução da velocidade na meia camada superior da coluna d'água devido ao fato do lançamento agir como um obstáculo ao escoamento ambiente. Nas seções subsequentes há um incremento nas velocidades das camadas superficiais, enquanto nas demais camadas as velocidades voltam a apresentar um perfil logarítmico (Figura 34A).

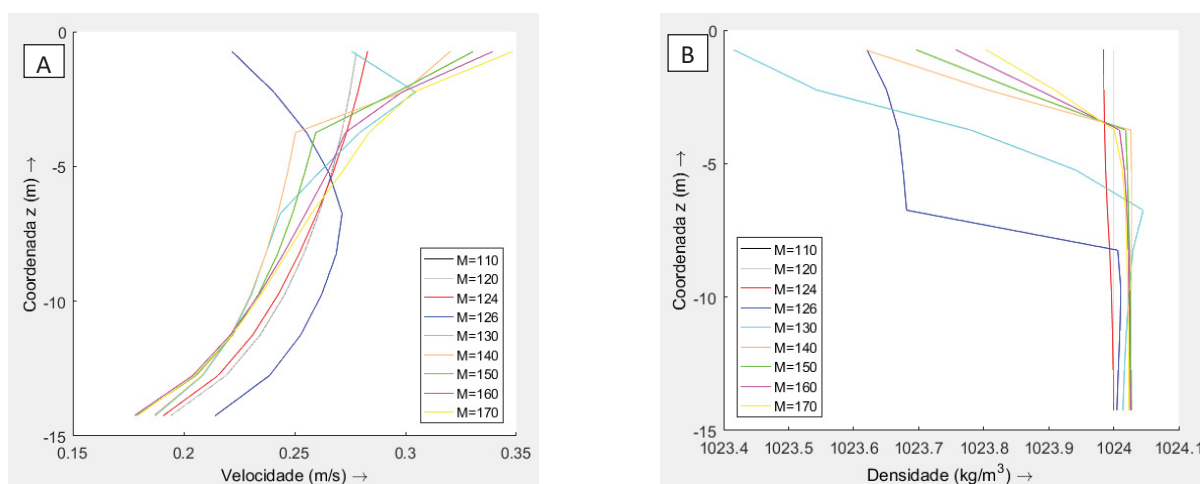


Figura 34 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento ($N=20$) nas seções transversais $M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 para o caso Teste 2 com acoplamento passivo. O lançamento é feito na meia camada superior da coluna d'água em $M=126$.

Nos perfis verticais de densidade apresentados na Figura 34B observa-se alterações de até $0,6 \text{ kg/m}^3$ nas seções próximas ao lançamento, havendo uma redução destas alterações nas seções mais a jusante, porém são ainda observadas pequenas alterações a 2300 m ($M=170$) do lançamento.

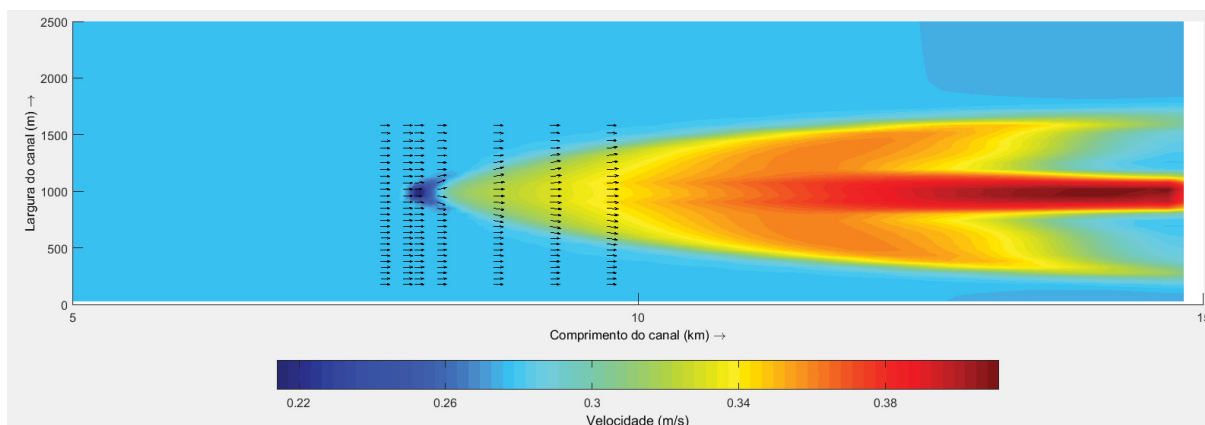


Figura 35 – Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Caso Teste 2) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 300 \text{ m}$.

O lançamento executado na metade superior da coluna d'água provocou uma redução da velocidade nas camadas superiores na região logo após o mesmo (Figura 35) e um aumento da velocidade nas camadas inferiores (Figura 36 e Figura 37), causado pelo princípio da conservação de massa.

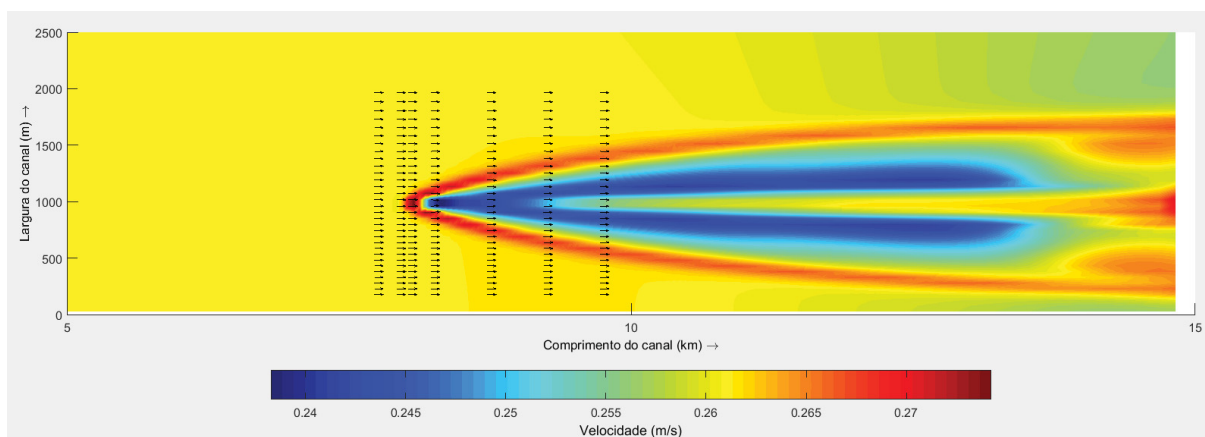


Figura 36 – Velocidades na camada do meio do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Caso Teste 2) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 300 \text{ m}$.

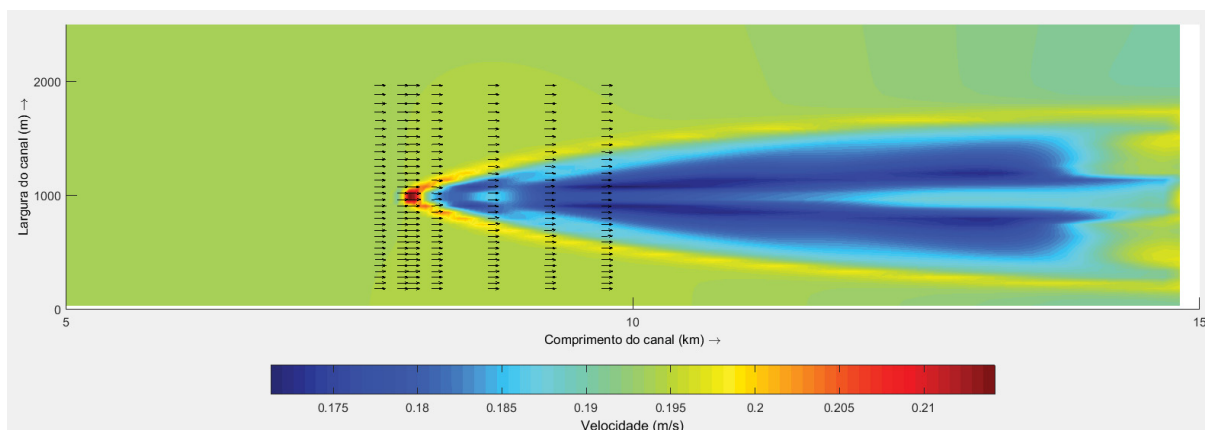
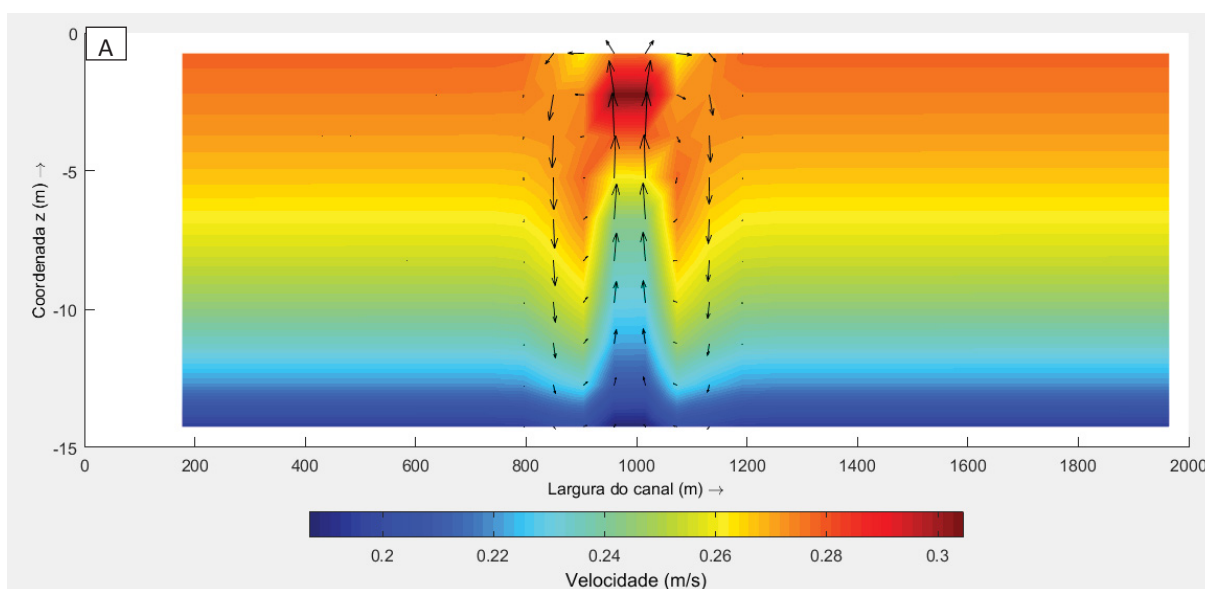


Figura 37 - Velocidades na camada de fundo do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Caso Teste 2) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$.

Nas seções transversais mais a jusante do lançamento, a partir de 200 m do mesmo ($M=130$), observa-se um comportamento hidrodinâmico simétrico em relação a linha central do lançamento nas camadas superior, do meio e do fundo. Este comportamento se deve ao fato de que a velocidade do escoamento ambiente impede que haja grande um espalhamento lateral gerando assim células de recirculação laterais que vão se ampliando à medida que ocorre um distanciamento do ponto de lançamento (Figura 38).



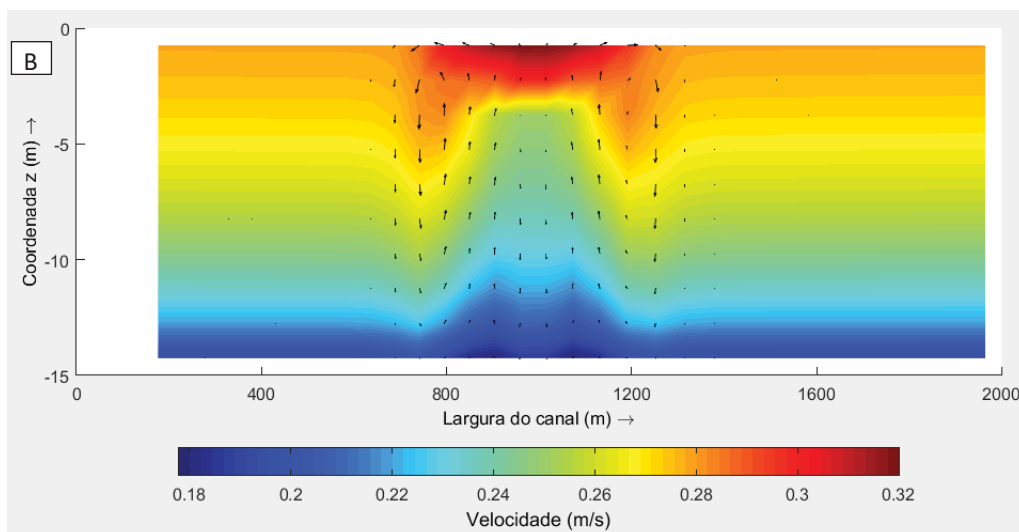


Figura 38 – Velocidades nas seções transversais (A) 200 m (M=130) e (B) 700 m (M=140) a jusante do ponto de lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ para o acoplamento passivo no caso teste 2. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: $1 \text{ m/s} = 300 \text{ m}$ e escala vertical: 50 vezes maior.

4.2.3.2 Acoplamento dinâmico

Nos resultados com o acoplamento dinâmico, assim como os obtidos com o acoplamento nulo e passivo, a redução da velocidade ambiente, comparado a velocidade ambiente do caso teste 1, diminui a dominância da mesma sobre o comportamento pluma gerando modificações mais significativas do que as observadas no caso anterior.

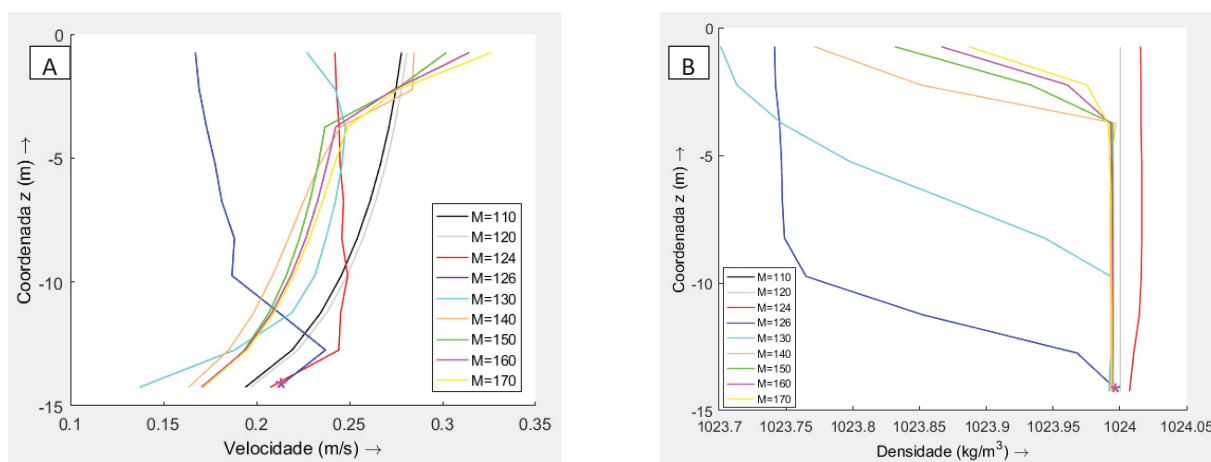


Figura 39 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170 para o caso teste 2 com o acoplamento dinâmico. O local do lançamento está indicado por (*).

Analisando-se os perfis verticais de densidade (Figura 39B), verifica-se um comportamento similar ao obtido no caso teste 1, onde o lançamento gera uma estratificação fraca (Tipo D do CORMIX) observada a 100 m a jusante do local do lançamento, M = 126, porém neste caso teste os perfis não voltam a apresentar uniformidade mesmo à 2300 m do lan-

çamento. Comparando com os resultados obtidos com o acoplamento passivo para a mesma situação nota-se que com o acoplamento dinâmico os processos de mistura são mais efetivos.

Neste caso teste os perfis verticais de velocidade podem ser divididos em três regiões de comportamento semelhante: a montante do lançamento, a jusante do lançamento e na região do campo próximo (Figura 39A).

A montante da descarga dos efluentes ($M=110$ e 120) os perfis permanecem praticamente iguais aos do ambiente sem o lançamento. Na região do campo próximo, os perfis da seção aonde ocorre o lançamento ($M=124$) e aonde finaliza o campo próximo ($M=126$) são os que apresentam maior diferença com os demais pois são os que estão diretamente envolvidos com o acoplamento dinâmico.

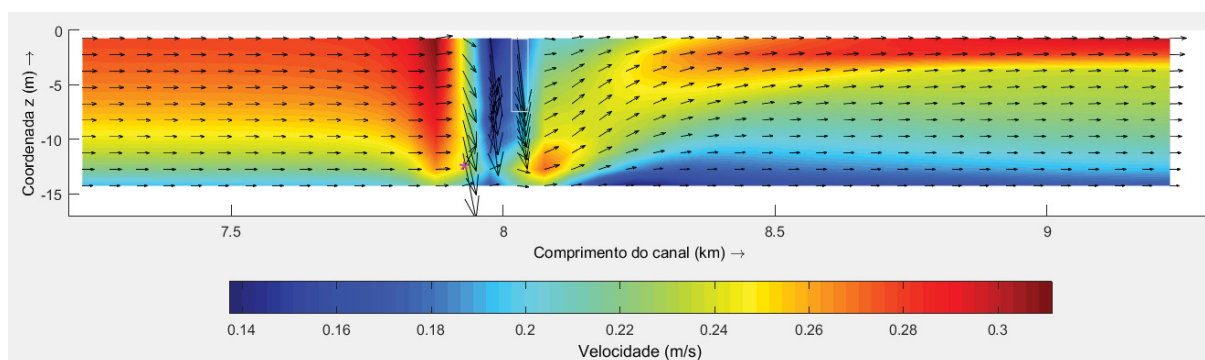


Figura 40 - Velocidades da seção longitudinal que contém o ponto de lançamento (*) e os pontos de retorno de água retirada pelo arraste (□) ($N=20$) geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 2) utilizando o acoplamento dinâmico, desde 700 m a montante do lançamento ($M=110$) até 1300 m a jusante ($M=150$). Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$ e escala vertical: 20 vezes maior.

Analisando-se o perfil da seção longitudinal que contém o ponto de lançamento ($N=20$), entre 700 m a montante ($M=110$) e 1300 m a jusante ($M=150$) do aporte de efluentes, na Figura 40, é possível visualizar o comportamento dos perfis verticais de velocidade observados na Figura 39A. O retorno da água retirada do ambiente pelo processo de arraste do jato ocorre na meia camada superior da coluna d'água e funciona como uma barreira para o escoamento ambiente, que por possuir uma velocidade não muito alta não consegue suplantar a mesma direcionando o escoamento ambiente para as camadas próximas ao fundo do canal. Este processo é o responsável pela diminuição das velocidades na região próxi-

ma ao lançamento nas camadas superiores e do meio do canal e pelo aumento destas nas camadas mais próximas ao fundo do canal.

Na região a montante do lançamento as velocidades não sofrem alterações apresentando perfil logarítmico similar ao da base de comparação. E a jusante as velocidades decrescem linearmente da superfície até aproximadamente a coordenada z de -4 m e deste ponto até o fundo do canal apresentam um perfil logarítmico. Nesta cota, nos perfis de densidade, observa-se um ponto de separação entre as camadas que apresentam uma leve estratificação e as camadas onde a densidade está uniforme, explicando o comportamento dos perfis de velocidade a partir de 800 m do ponto de lançamento ($M=140$).

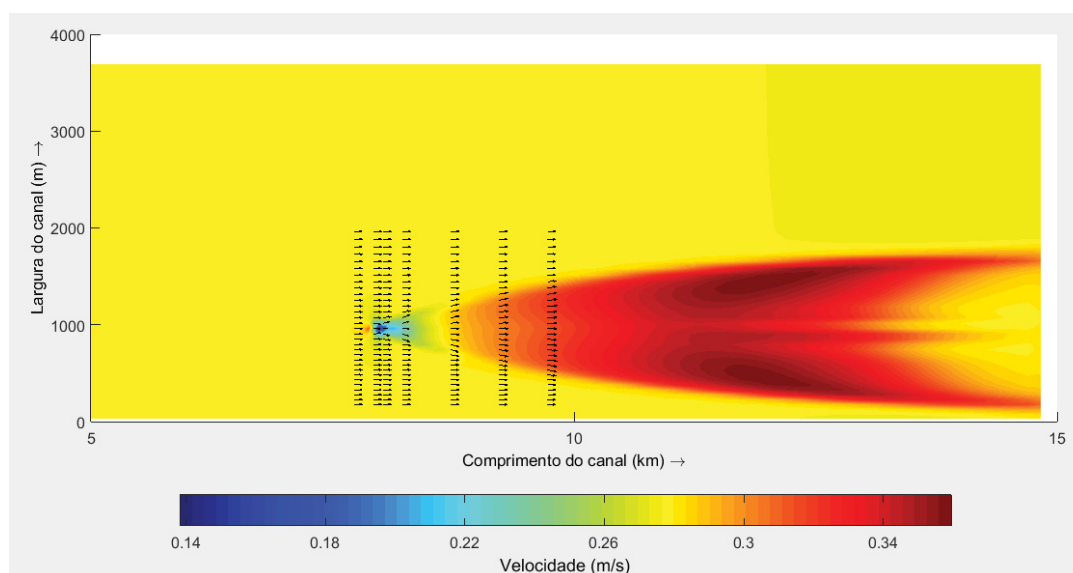


Figura 41 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 2) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 300 \text{ m}$.

Na Figura 41 observa-se a distribuição das velocidades resultantes do acoplamento dinâmico na superfície do canal. Verifica-se que a montante do lançamento, no eixo do mesmo, há um pequeno aumento nas velocidades e a jusante as velocidades se reduzem devido ao efeito de sombra gerado pela presença do lançamento que funciona como um obstáculo ao escoamento ambiente. Posteriormente a este efeito as velocidades voltam a aumentar.

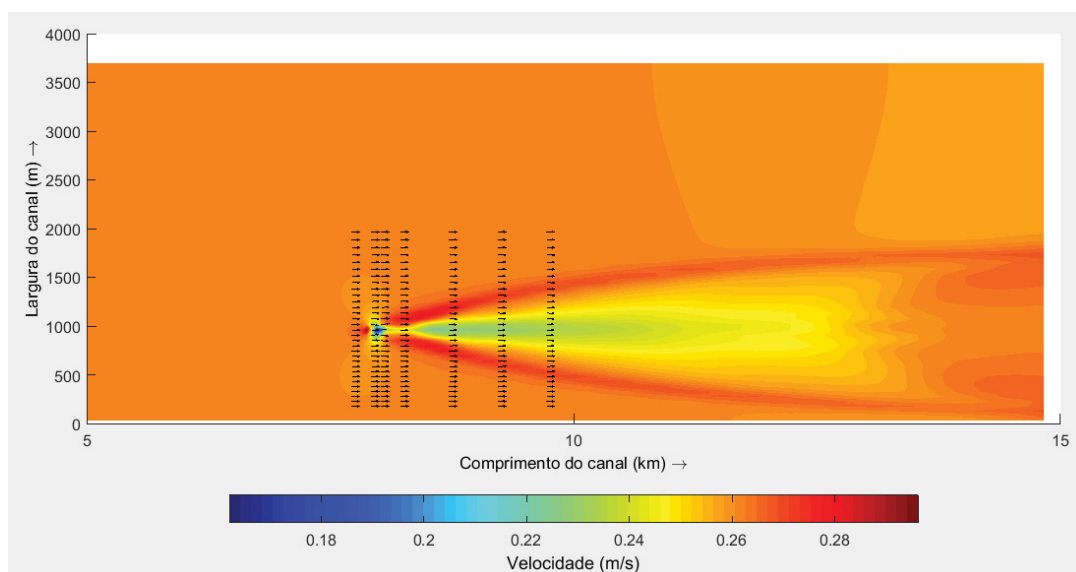


Figura 42 - Velocidades na camada do meio do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 2) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 300 \text{ m}$.

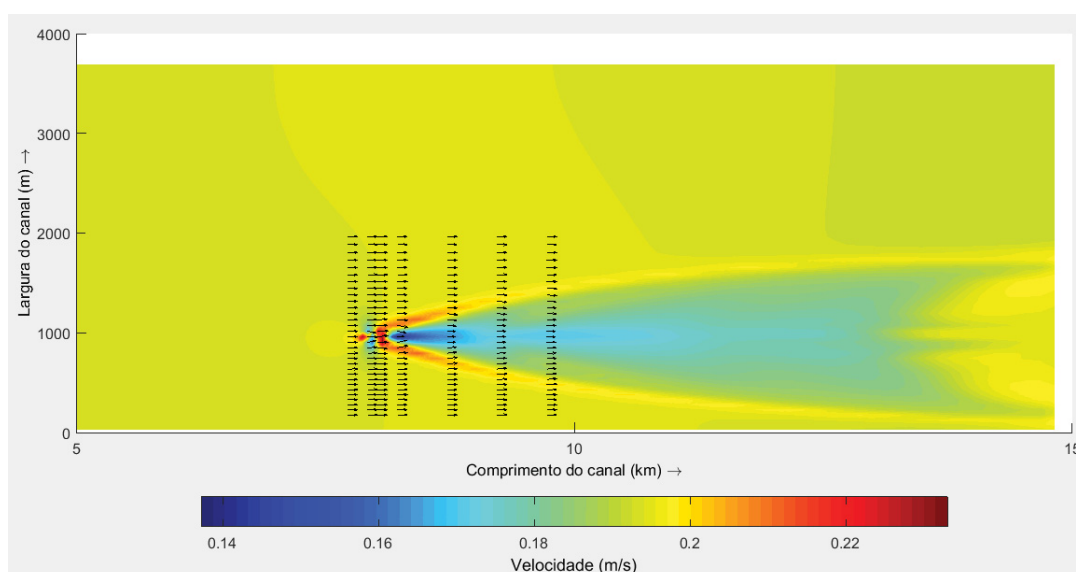


Figura 43 - Velocidades na camada do fundo do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 2) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$.

Comparando com as velocidades obtidas com o acoplamento passivo (Figura 35) nota-se que mais próximo ao final do canal as maiores velocidades se encontram no eixo do lançamento para o acoplamento passivo enquanto que com o acoplamento dinâmico as maiores velocidades estão nas laterais da pluma. Este comportamento é gerado pelas células de circulação lateral (Figura 44), porém devido a diferença na forma de realizar o acoplamento, estas mesmas células geraram esses resultados distintos.

Ainda comparando com os resultados do acoplamento passivo, verifica-se que a dinâmica gerada pelo acoplamento dinâmico no escoamento ambiente diferencia-se nas camadas do meio (Figura 42) e fundo do canal (Figura 43) e cujo comportamento pode ser observado no perfil longitudinal apresentado na Figura 40.

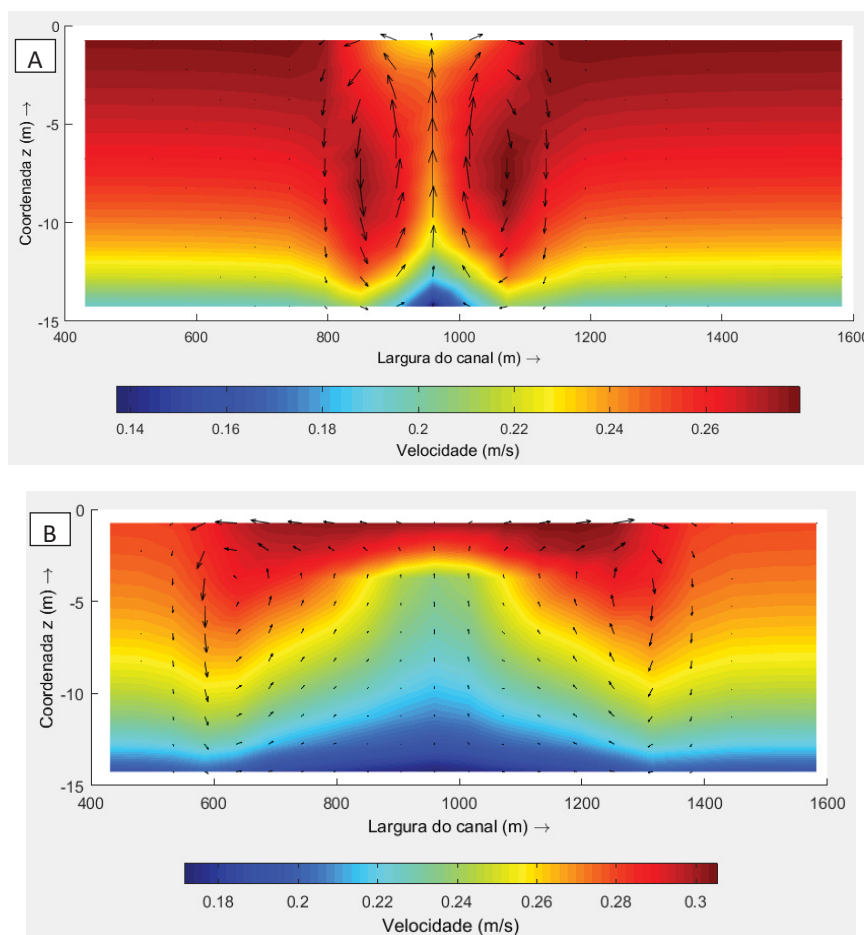


Figura 44 - Velocidades nas seções transversais a (A) 300 m ($M=130$) e a (B) 1300 m ($M=150$) a jusante do ponto de lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ para o acoplamento dinâmico no caso teste 2. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: (A) $1 \text{ m/s} = 300 \text{ m}$, (B) $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$ e escala vertical: 30 vezes maior.

4.2.4 Caso teste 3

No caso teste 3 as velocidades do perfil vertical da base de comparação variam entre $0,085$ e $0,125 \text{ m/s}$ e neste ambiente são lançados $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Apesar de ser uma vazão baixa, o lançamento efetuado em um ambiente pouco dinâmico resulta em um ambiente com uma leve estratificação, assim como foi obtido no caso teste 2 (Figura 34B).

4.2.4.1 Acoplamento nulo e passivo

Os resultados dos perfis de velocidade e densidade apresentados na Figura 45 são semelhantes aos obtidos no caso teste 2.

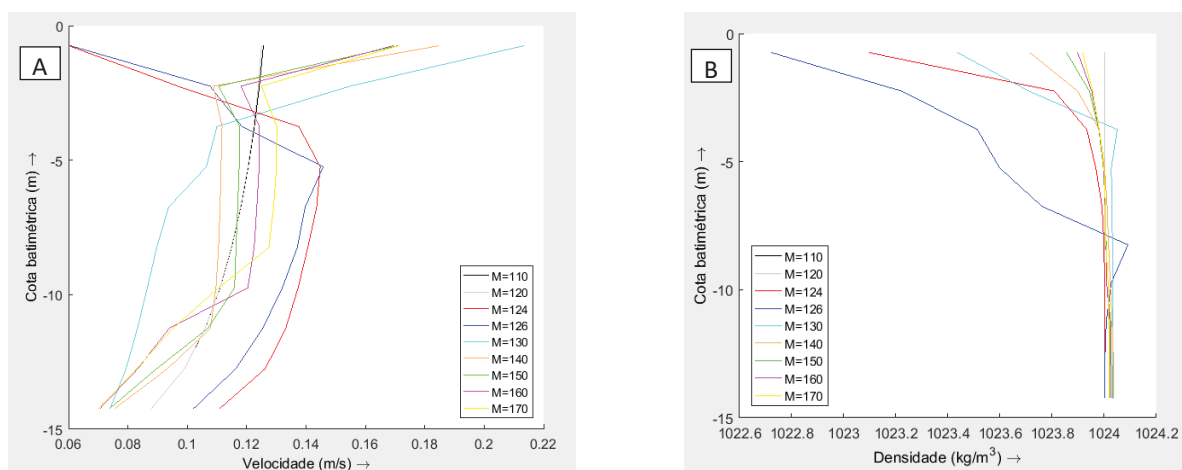


Figura 45 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170 para o caso Teste 3 com acoplamento passivo. O lançamento é feito na meia camada superior da coluna d'água em M=126.

Porém, como neste caso teste a velocidade do escoamento ambiente é menor o lançamento aumenta a sua influência alterando inclusive seções transversais a montante do mesmo, como se observa na Figura 45. A a seção a 100 m a montante (M=124).

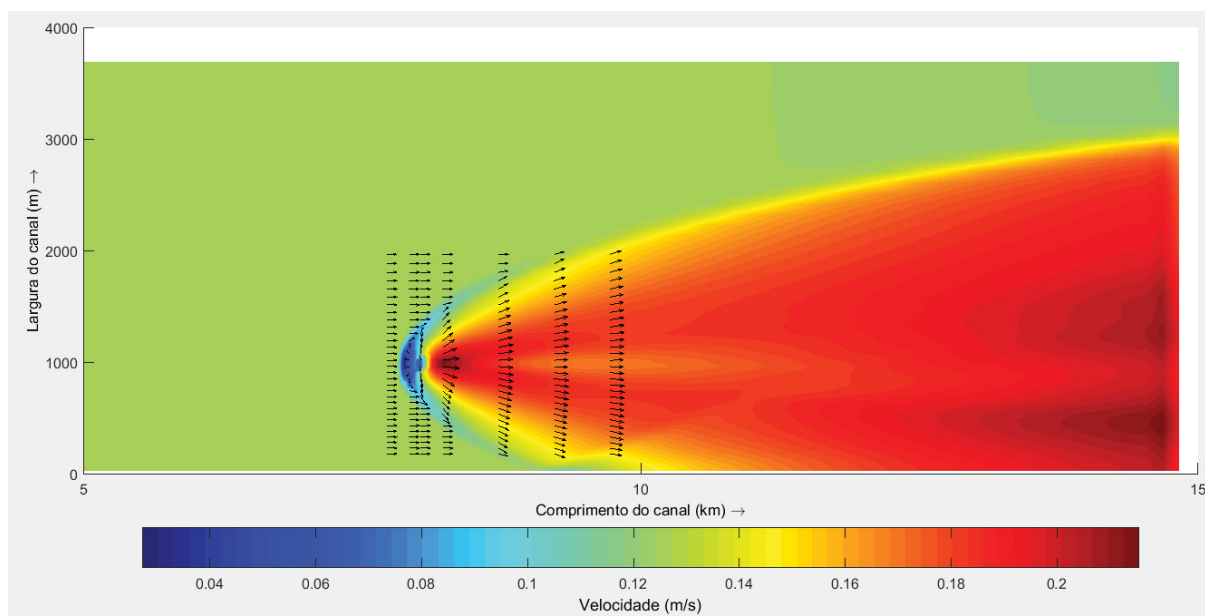


Figura 46 – Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Caso Teste 3) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=120, 124, 126, 130, 140, 150 e 160. Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 700 \text{ m}$.

O comportamento das velocidades no plano horizontal (xy) segue o mesmo padrão observado no caso teste 2, de modo que se apresenta somente as velocidades na camada de superfície (Figura 46). Nesta camada há uma redução da velocidade nas seções a montante e

adjacentes ao lançamento para posterior aumento da velocidade nas seções a jusante, nas camadas do meio e do fundo do canal há um aumento da velocidade nas seções a montante, enquanto que nas seções a jusante a velocidade, no eixo do lançamento, oscila por momentos diminuindo e depois aumentando. Ainda comparando com os resultados do caso teste 2, verifica-se que devido a menor dominância da velocidade do escoamento ambiente há um espalhamento lateral maior das velocidades induzidas porém, o espalhamento a montante é pequeno refletindo em parte o comportamento esperado de escoamento baseado no número de Froude do ambiente.

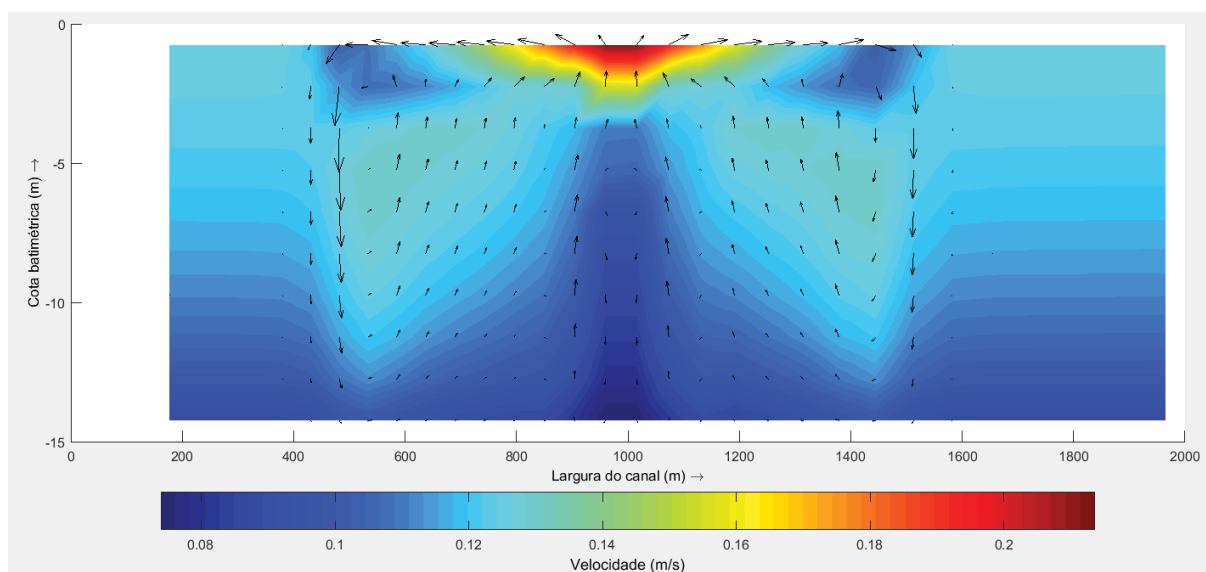


Figura 47 – Velocidades nas seções transversais a 200 m ($M=130$) a jusante do ponto de lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ para o acoplamento passivo no caso teste 3. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$ e escala vertical: 50 vezes maior.

O espalhamento lateral na superfície também pode ser visualizado na Figura 47, que ainda demonstra a presença das células de circulação laterais. Estas apresentam, para uma mesma seção transversal do caso teste 2, $M=130$, uma largura maior devido ao fato da velocidade ambiente menor permitir que as velocidades induzidas se espalhem mais lateralmente.

4.2.4.2 Acoplamento dinâmico

Os resultados obtidos neste caso teste com acoplamento dinâmico assemelham-se bastante aos obtidos no caso teste anterior, também com o acoplamento dinâmico, com a diferença que devido ao escoamento ambiente apresentar menor velocidade do escoamento ambiente as alterações, neste caso teste, são mais significativas.

Os perfis verticais de densidade (Figura 48B) demonstram que a menor velocidade do escoamento ambiente permite o deslocamento do lançamento em contra fluxo gerando a diminuição da densidade do perfil observado no ponto a montante do lançamento $M=124$.

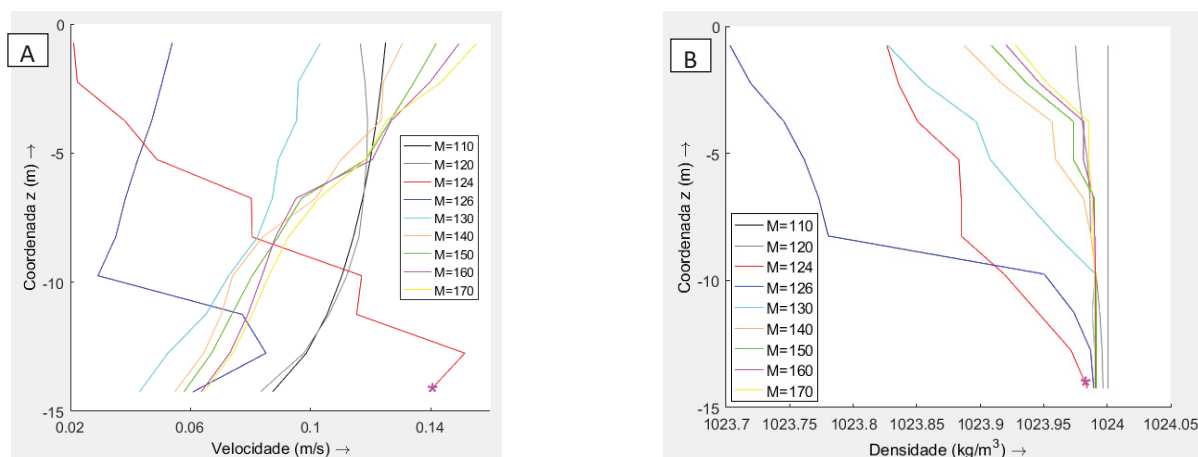


Figura 48 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais $M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 para o caso teste 3 com o acoplamento dinâmico. O local do lançamento está indicado por (*).

Verifica-se que os perfis verticais de velocidade também podem ser divididos em três regiões de comportamento semelhante: a montante do lançamento, a jusante do lançamento e na região do campo próximo (Figura 48A).

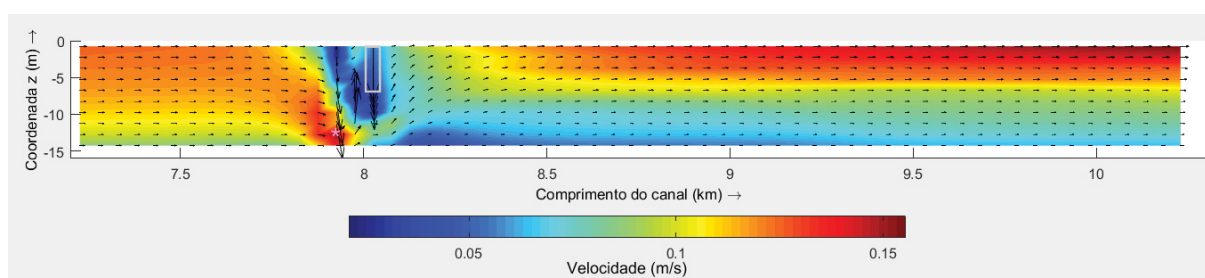


Figura 49 - Velocidades da seção longitudinal que contém o ponto de lançamento (*) e os pontos de retorno de água retirada pelo arraste (□) (N=20) geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 3) utilizando o acoplamento dinâmico, desde 700 m a montante do lançamento ($M=110$) até 2300 m a jusante ($M=170$). Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: $1 \text{ m/s} = 150 \text{ m}$ e escala vertical: 20 vezes maior.

Analisando-se o perfil da seção longitudinal que contém o ponto de lançamento (N=20), entre 700 m a montante ($M=110$) e 2300 m a jusante ($M=170$) do aporte de efluentes, na Figura 49, é possível visualizar as três regiões anteriormente citadas. O método aplicado no acoplamento dinâmico é o responsável pela diminuição das velocidades na região

próxima ao lançamento nas camadas superiores e do meio do canal e pelo aumento das mesmas nas camadas mais próximas ao fundo do canal.

Ainda observando a Figura 49 verifica-se que na região próxima ao lançamento a área que apresenta velocidades reduzidas pelo lançamento é maior do que a observada no caso teste 2. Este efeito é resultado da aplicação do método DESA, sendo a combinação do fato de que quando a água retirada pelo processo do arraste é retornada ao sistema volta com velocidade igual a zero (inclusão somente de fluxo de massa) e se espalha em todas as direções, inclusive em contra fluxo, e o fato de que quando a água é retirada do escoamento ambiente para obter as diluições calculadas para a linha central da pluma pelo CORMIX (detalhes no item 3.2.3) retira-se também quantidade de movimento.

Na região a montante do lançamento ($M=110$ e $M=120$) as velocidades não sofrem alterações apresentando perfil logarítmico similar ao da base de comparação. E a jusante (a partir de $M=140$) as velocidades decrescem aproximadamente de modo linear da superfície até o fundo do canal (Figura 48A).

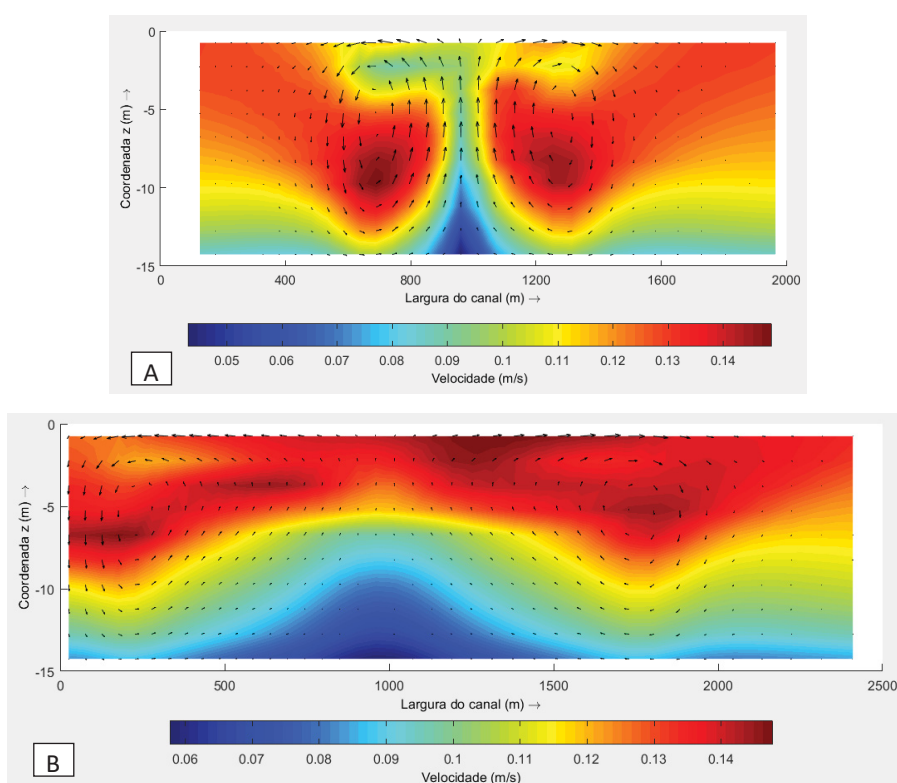


Figura 50 - Velocidades nas seções transversais a (A) 300 m ($M=130$) e a (B) 1300 m ($M=150$) a jusante do ponto de lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ para o acoplamento dinâmico no caso teste 3. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: (A) $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$, (B) $1 \text{ m/s} = 700 \text{ m}$ e escala vertical: 50 vezes maior.

Observa-se que as células de circulação lateral apresentam larguras crescentes à medida que se afastam do ponto de lançamento (Figura 50), assim como sua largura é maior do que as células laterais observadas no acoplamento passivo para o mesmo caso teste e maior do que o caso teste 2. Demonstrando que o acoplamento dinâmico gera modificações hidrodinâmicas mais significativas e que a velocidade do escoamento ambiente menor permite que haja um espalhamento lateral maior.

Este espalhamento lateral pode ser melhor observado nas distribuições horizontais de velocidade apresentadas na Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

Na camada superficial verificam-se alterações mais expressivas nas regiões próximas ao ponto de retorno da água retirada pelo arraste (68%) e no final do canal (43%). Por se tratar de um pequeno lançamento, mesmo ocorrendo em um ambiente com velocidades baixas, observa-se uma leve formação da cunha da pluma (*wedge*) se dirigindo na direção para montante do escoamento. Neste caso, o comportamento da pluma não se enquadra completamente na classificação de escoamento baseado no valor do número de Froude do ambiente.

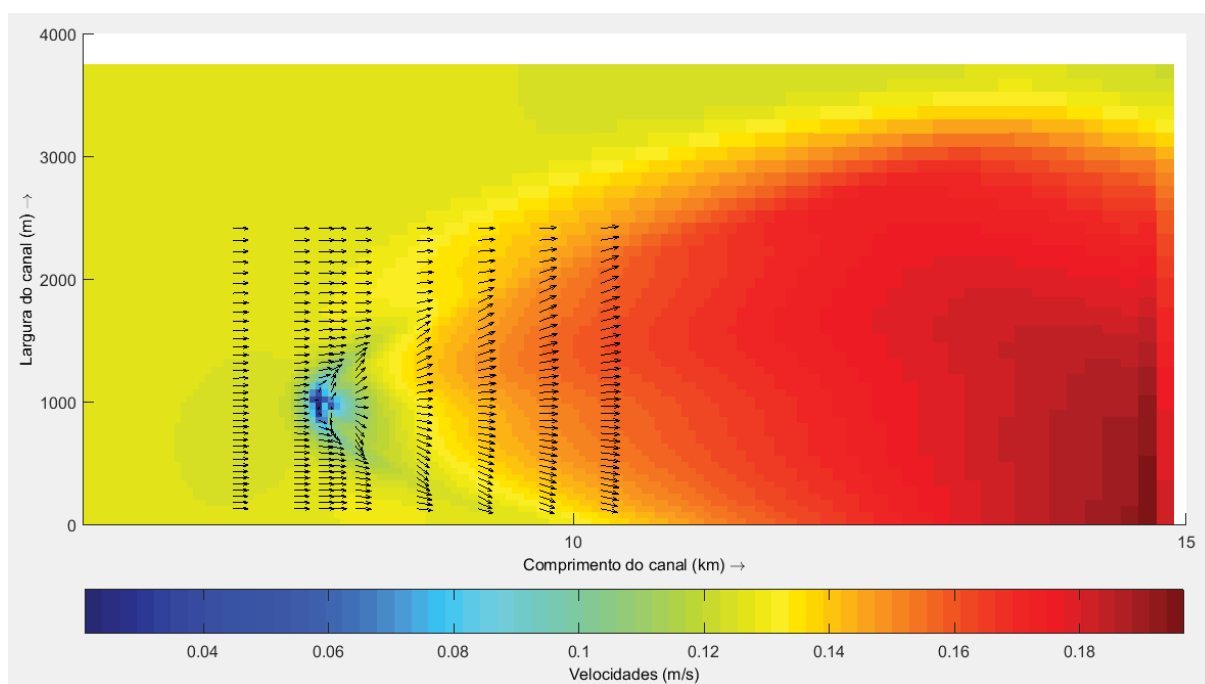


Figura 51 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 3) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 1000 \text{ m}$

Verifica-se que no fundo do canal, Figura 51, há uma redução da velocidade a jusante do ponto de lançamento, onde situação também pode ser visualizada no perfil longitudinal

apresentado na Figura 49. Este comportamento ocorre devido a presença do lançamento na meia camada superior que funciona como um obstáculo para o fluxo ambiente e desta forma faz com que os fluxos das camadas de fundo se movam em parte para a superfície. O campo vetorial apresenta uma leve alteração com os vetores convergindo para o eixo da descarga a partir da seção onde acontece o aporte de efluentes.

Na camada do meio (Figura 52), no eixo do lançamento, as alterações são sentidas somente no campo próximo, porém nas regiões adjacentes laterais há a formação de zonas de recirculação (Figura 50) com o aumento das velocidades na ordem de 10^{-2} m/s, devido a ação do lançamento em um ambiente pouco dinâmico.

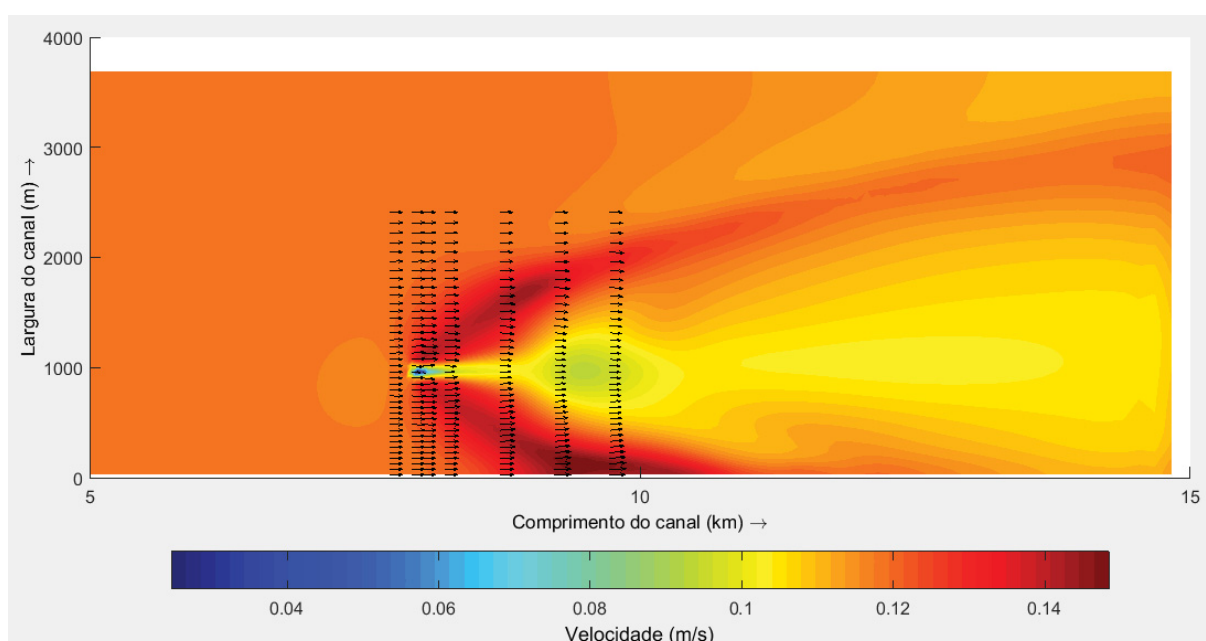


Figura 52 - Velocidades na camada do meio do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 3) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 1000 \text{ m}$.

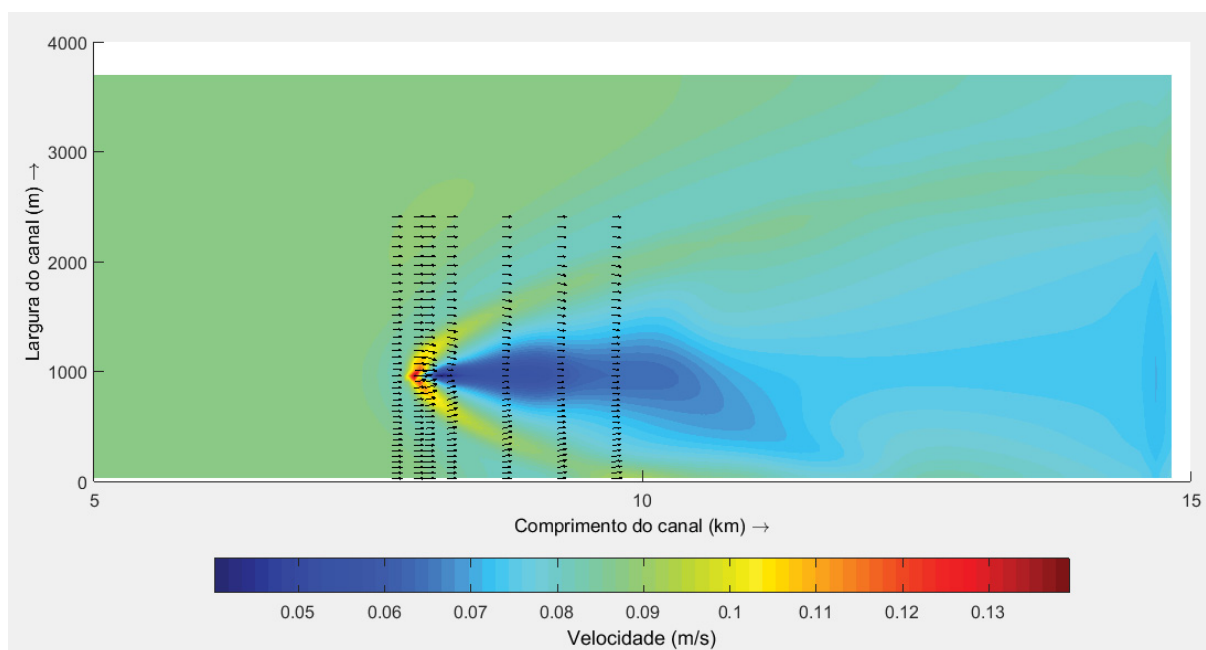


Figura 53 - Velocidades na camada do fundo do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 3) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 1000 \text{ m}$.

4.2.5 Caso teste 4

O caso teste 4 possui a mesma hidrodinâmica do ambiente do caso teste 1 com o diferencial de receber o aporte de um lançamento com alta vazão, $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.2.5.1 Acoplamento nulo e passivo

Por apresentar velocidades elevadas variando de $0,75 \text{ m/s}$ na camada mais próxima ao fundo do canal até $1,1 \text{ m/s}$ na superfície, a inclusão de um grande despejo de efluentes não altera a hidrodinâmica instantaneamente, modificando o perfil logarítmico de velocidades somente após 700 m do lançamento, mesmo havendo modificações instantâneas no perfil de densidade, como se observa na Figura 54B. Este comportamento deve-se ao fato que neste teste a hidrodinâmica é dominada pela velocidade ambiente.

Os campos de velocidade se comportam similarmente ao que ocorre no caso teste 1 pois em ambos testes a velocidade ambiente domina a circulação hidrodinâmica. E assim como no caso teste 1, a hidrodinâmica das camadas fundo, meio e superfície assemelham-se apresentando como diferença, a velocidade característica da camada devido a imposição do perfil logarítmico de velocidades. Desta forma, apresenta-se somente o campo de velocidades representativo da camada de superfície do canal.

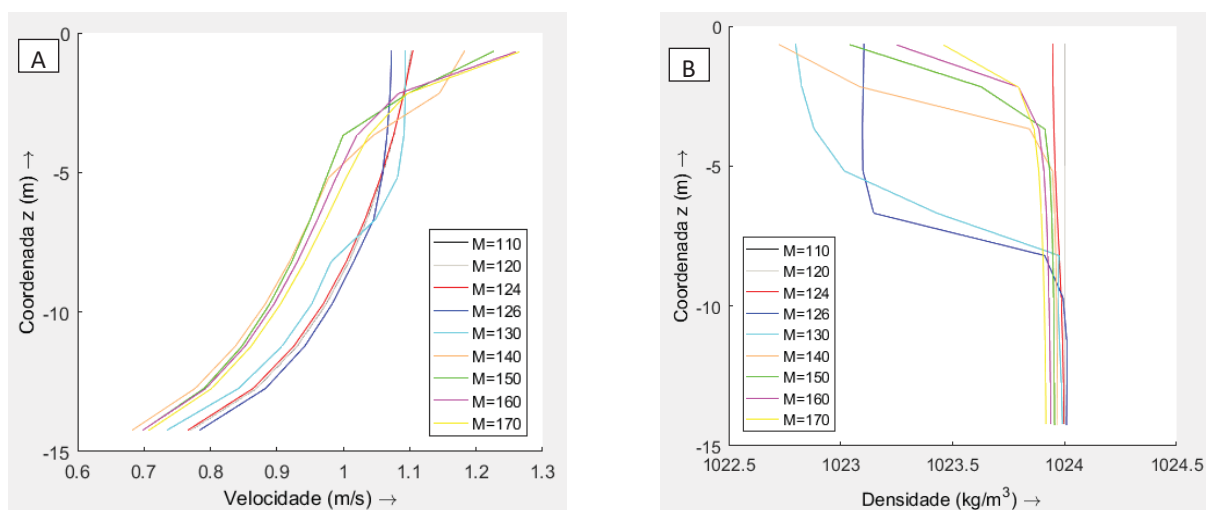


Figura 54 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170 para o caso teste 4 com acoplamento passivo. O lançamento é feito na meia camada superior da coluna d'água em M=126.

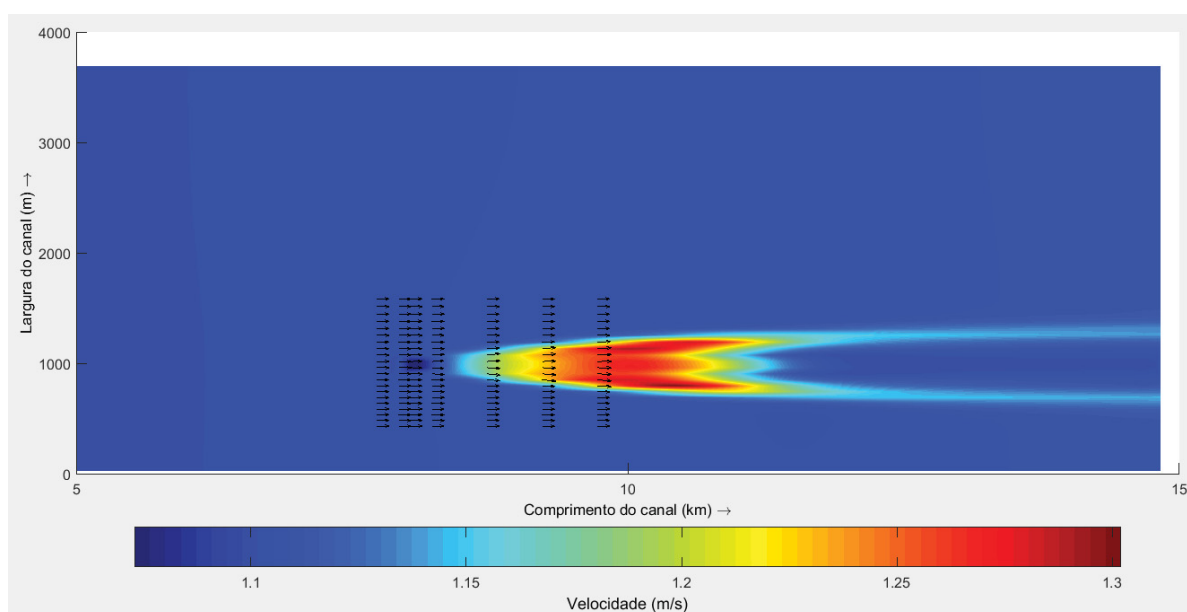


Figura 55 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de 40 m³/s (caso teste 4) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=120, 124, 126, 130, 140, 150 e 160. Escala dos vetores: 1 m/s = 100 m.

Nota-se na Figura 55 que o campo vetorial não sofre alterações visuais em magnitude e direção, representando o escoamento ambiente como se não houvesse o lançamento, mesmo sendo este de alta vazão. Explica-se tal fato, novamente, por conta do domínio da velocidade ambiente.

4.2.5.2 Acoplamento dinâmico

O acoplamento dinâmico aplicado caso teste 4 gerou alterações no escoamento, conforme se pode observar na Figura 57.

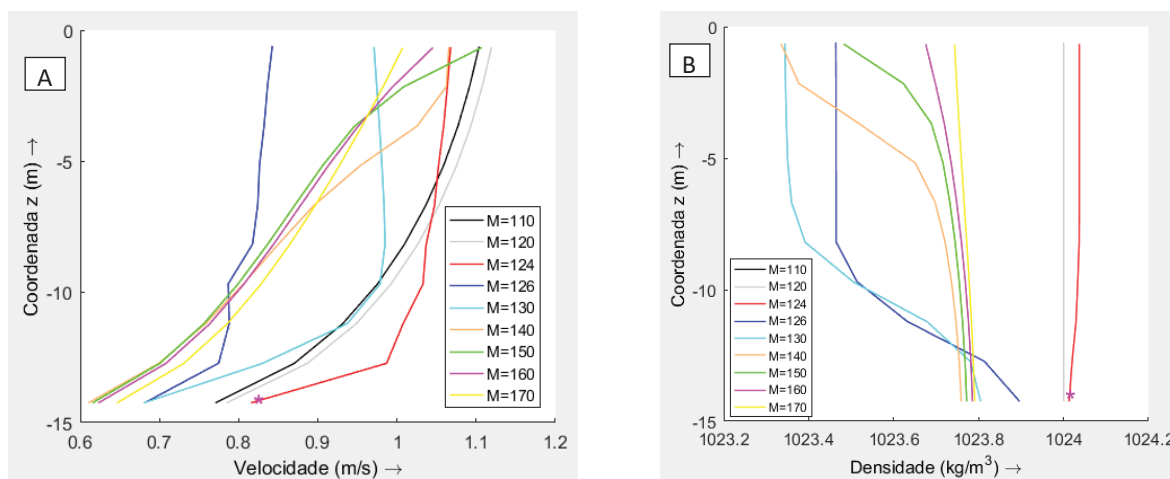


Figura 56 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais $M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 para o caso teste 4 com o acoplamento dinâmico. O local do lançamento está indicado por (*).

Analisando os perfis verticais de velocidade (Figura 56A) nota-se que estes podem ser divididos em três regiões como nos casos testes 2 e 3, montante com $M=110$ e $M=120$, região do lançamento com $M=124, 126$ e 130 e jusante a partir de $M=140$. Como a velocidade do ambiente é alta, mesmo a grande vazão de efluentes não altera significativamente os perfis de velocidade na região do lançamento, alterando somente nas seções mais a jusante após a incorporação da água que retorna ao escoamento ambiente pela aplicação do método DESA.

Nos perfis verticais de densidade (Figura 56B) verifica-se que, devido a alta vazão de entrada de efluentes, o sistema necessita de mais tempo para reestabelecer os perfis verticais impostos na condição de contorno do que no caso teste 1 e os perfis de equilíbrio passam a ter outros valores, mas tendem a um perfil de densidade uniforme. Isto não ocorre com o acoplamento passivo onde a coluna d'água tende a ficar estratificada após o lançamento dos efluentes.

Neste caso teste, verifica-se o mesmo comportamento observado nos casos testes anteriores. Um pequeno aumento na velocidade a montante do lançamento, seguido pela diminuição da mesma na região do lançamento e depois um novo aumento (Figura 57). Como os resultados nas demais camadas seguem o mesmo comportamento, optou-se por apresentar somente a distribuição horizontal de velocidades da camada superficial.

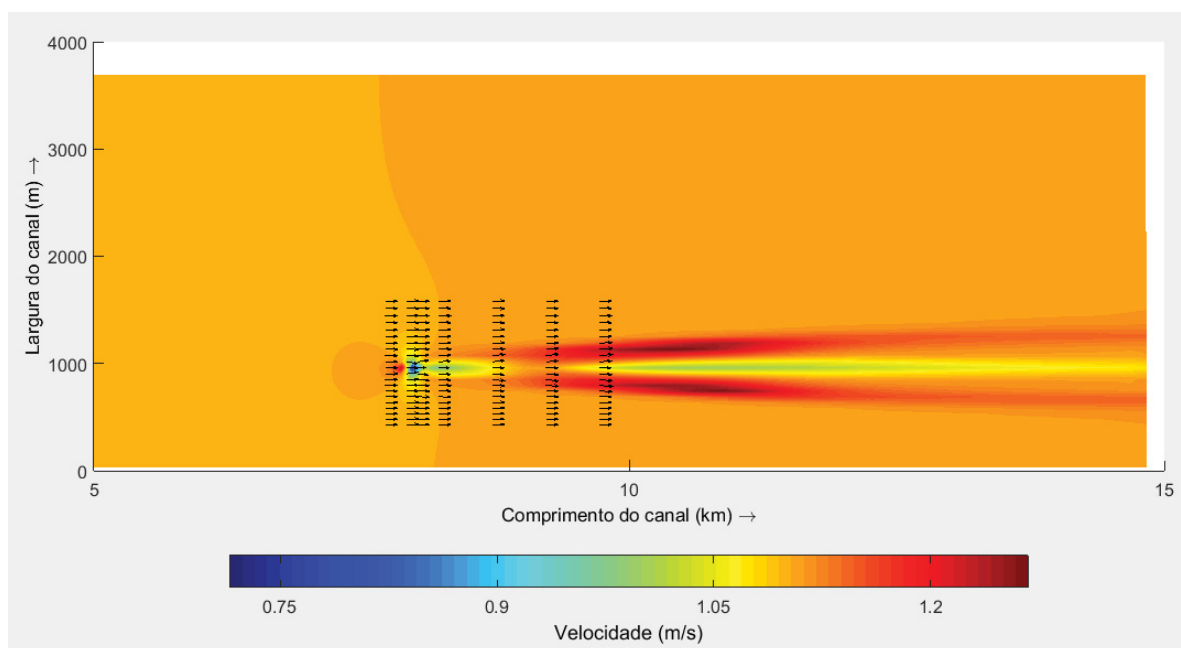


Figura 57 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 4) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$.

A alta velocidade do escoamento ambiente resulta em uma alta vazão gerada pelo processo de arraste da pluma, e esta vazão é incorporada ao sistema no final do campo próximo somando-se à vazão de efluentes. Esta quantidade de água adicionada ao escoamento ambiente não consegue espalhar lateralmente devido a velocidade do escoamento, de forma que submerge formando as células de recirculação lateral e aumentando as velocidades a jusante do lançamento nos limites laterais da pluma com o escoamento ambiente. Este comportamento pode ser observado na distribuição horizontal de velocidades na Figura 57 e nas velocidades de uma seção transversal a jusante do lançamento na Figura 58.

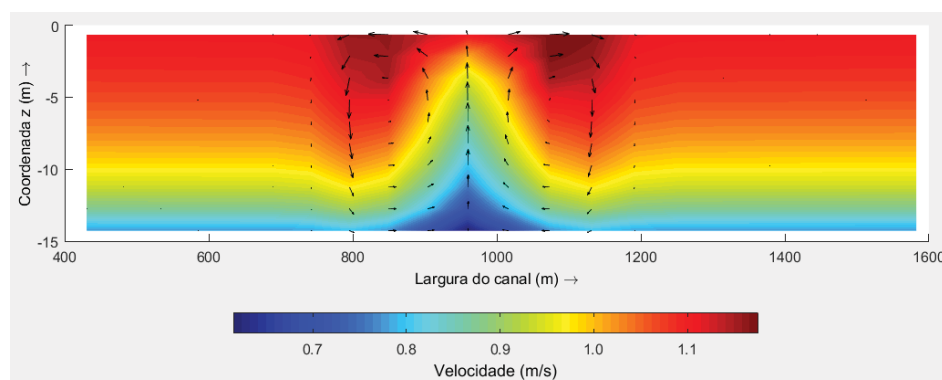


Figura 58 - Velocidades nas seções transversais a 1300 m ($M=150$) a jusante do ponto de lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ para o acoplamento dinâmico no caso teste 4. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: $1 \text{ m/s} = 200 \text{ m}$ e escala vertical: 20 vezes maior.

4.2.6 Caso teste 5

No caso teste 5 o escoamento ambiente é igual ao caso teste 2 porém, neste ambiente é feito um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.2.6.1 Acoplamento nulo e passivo

Para este teste, verifica-se que a alta vazão altera a estratificação do canal que deixa de ser uniforme para ser estratificado, e desta forma altera também a circulação hidrodinâmica.

Nota-se que o ambiente com escoamento em regime permanente (densidade constante igual 1024 kg/m^3), demonstrado na Figura 59 pelas seções $M=110$ e $M=120$, é quebrado pelo lançamento do efluentes (densidade igual a 998 kg/m^3) demonstrado pela seção $M=126$. Como a quantidade lançada é alta a seção que antecede o lançamento ($M=124$) sente o mesmo e sofre alteração tanto da velocidade como da densidade. As seções a jusante do lançamento têm o seu perfil de velocidade diminuído e mesmo a distâncias maiores do lançamento os perfis apresentam alterações ao longo da profundidade demonstrando que este lançamento altera a hidrodinâmica do ambiente significativamente.

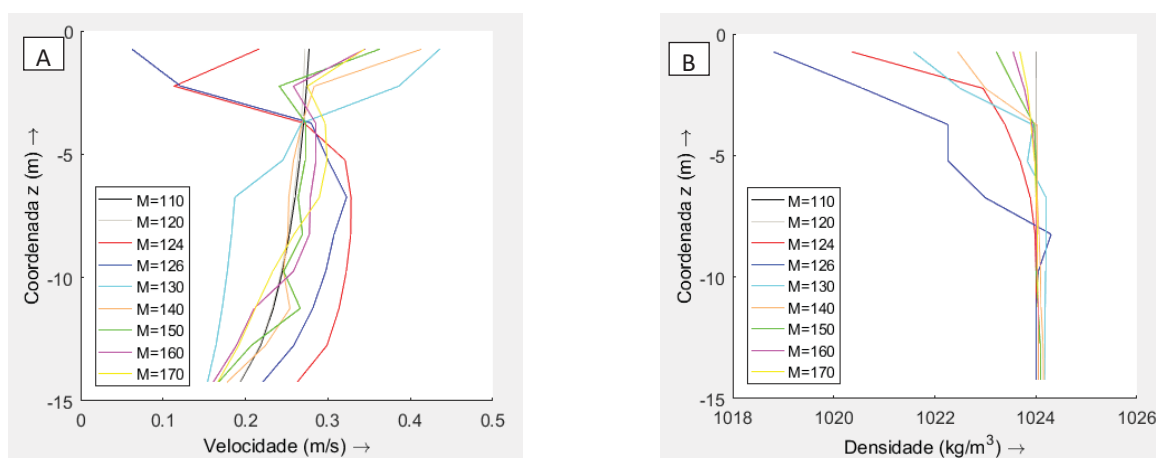


Figura 59 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais $M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 para o caso teste 5 com acoplamento passivo. O lançamento é feito na meia camada superior da coluna d'água em $M=126$.

Este comportamento pode ser também observado espacialmente distribuído, em campos de velocidades em planta, plano xy, e em perfil transversal, plano yz. Como as alterações mais significativas, com mudanças também no campo de vetores, ocorrem na camada da superfície do canal, optou-se por apresentar uma representação gráfica somente des-

ta camada (Figura 60). As camadas do meio e fundo do canal apresentam comportamento similar ao dos casos testes anteriores.

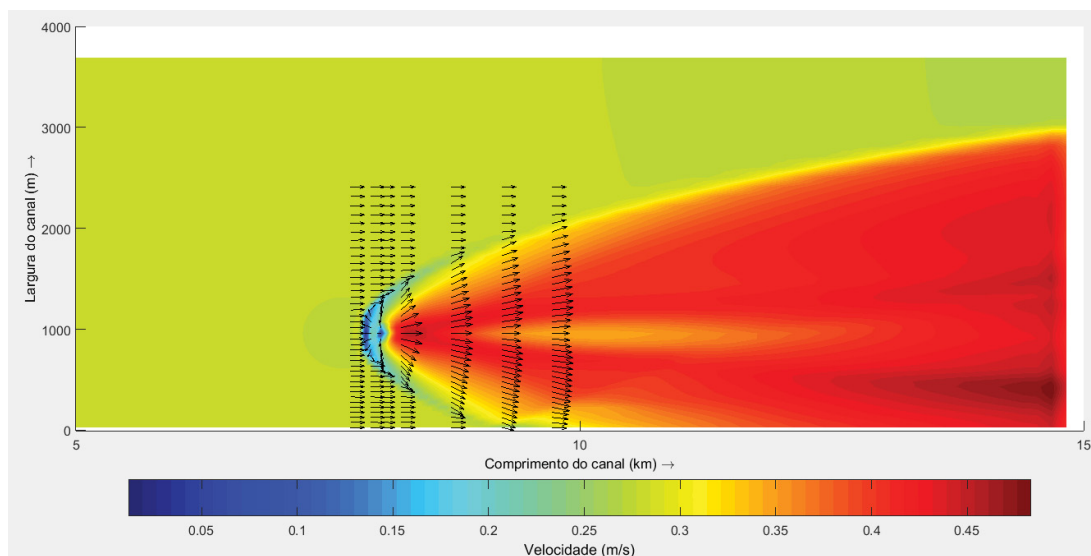


Figura 60 – Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 5) utilizando o acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$.

Na camada superior do canal observa-se uma diminuição das velocidades a montante do aporte dos efluentes e, aumento das velocidades a jusante do lançamento. Isto decorre do fato que a pluma alcança a superfície com energia suficiente para gerar o espalhamento horizontal e a velocidade do escoamento ambiente permite que este espalhamento ocorra em todas as direções. Ao ir em contra fluxo acaba por diminuir a velocidade do escoamento a montante do lançamento e se movendo na direção do fluxo aumenta a mesma.

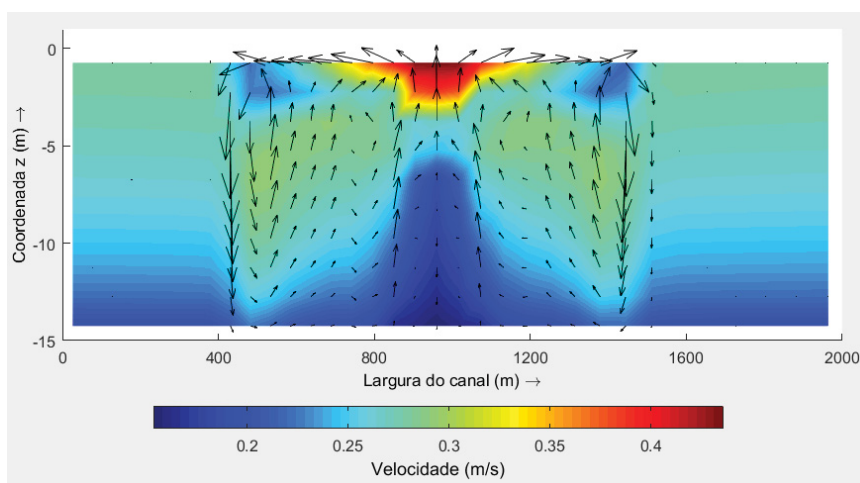


Figura 61 - Velocidades nas seções transversais a 200 m ($M=130$) a jusante do ponto de lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ para o acoplamento passivo no caso teste 5. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano yz. Escala horizontal dos vetores: $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$ e escala vertical: 50 vezes maior.

Comparando com estes resultados obtidos nos casos testes anteriores observa-se que as alterações hidrodinâmicas verificadas são similares ao do caso teste 3, onde um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ era realizado em um escoamento ambiente de velocidade de $0,11 \text{ m/s}$, mas neste caso teste com alterações mais significativas, como pode se observar na Figura 61.

O comportamento similar ao caso teste 3 está associado ao número de Froude do ambiente que apresenta valores similares de $0,14$ e $0,16$ para o caso teste 3 e 5, respectivamente.

4.2.6.2 Acoplamento dinâmico

O acoplamento dinâmico, aplicado ao caso teste 5, provocou mudanças significativas como se observa nas figuras que se seguem.

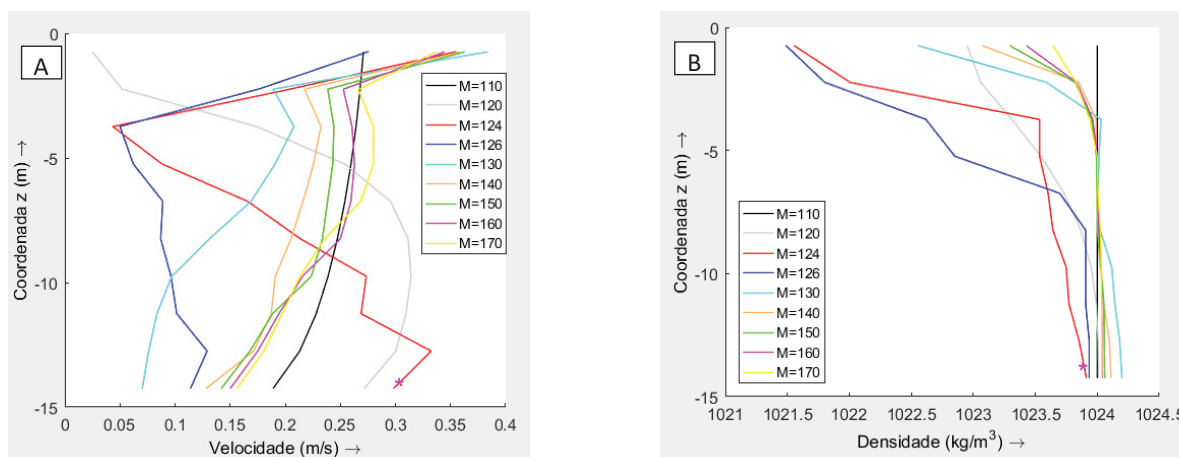


Figura 62 - Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=20) nas seções transversais M = 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170 para o caso teste 5 com o acoplamento dinâmico. O local do lançamento está indicado por (*).

Analisando a Figura 62A verifica-se que o ambiente exibe velocidades variando entre $0,18$ a $0,28 \text{ m/s}$ em um perfil vertical logarítmico sem alterações somente a partir da seção a 700 m a montante do lançamento (M=110), indicando que devido à alta vazão dos efluentes neste ambiente há alterações significativas a montante do lançamento.

Para poder compreender melhor o comportamento dos perfis de velocidade apresentados na Figura 62A, esta foi analisada em conjunto com o perfil longitudinal de velocidades na seção onde foi realizado o lançamento apresentado na Figura 63.

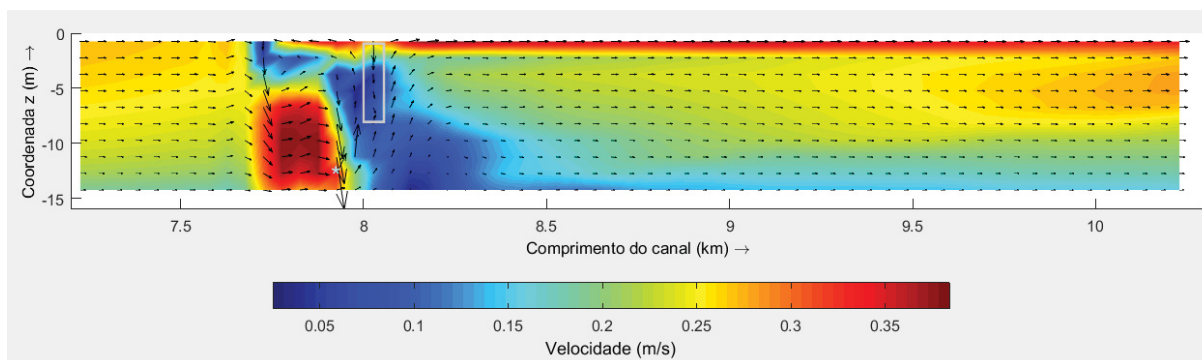


Figura 63 - Velocidades da seção longitudinal que contém o ponto de lançamento (*) e os pontos de retorno de água retirada pelo arraste (□) (N=20) geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 5) utilizando o acoplamento dinâmico, desde 700 m a montante do lançamento (M=110) até 2300 m a jusante (M=170). Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: $1 \text{ m/s} = 80 \text{ m}$ e escala vertical: 30 vezes maior.

A 200 m a montante do lançamento (M=120) configurou-se, na metodologia de acoplamento, o ponto de retirada das condições ambientais (ponto de monitoramento). Neste ponto, nas camadas de fundo e meio do canal há um aumento da velocidade causados pelo fato que a inserção de efluentes representa um obstáculo ao escoamento e dificulta a passagem do mesmo na meia camada superficial. Desta forma o escoamento ambiente é desviado para a meia camada inferior do canal somado a parte do fluxo que provém da recirculação gerada pela cunha da pluma (*wedge*). Os perfis de velocidade que contêm o ponto de lançamento (M=124) e o final do campo próximo (M=126) apresentam uma diminuição e um aumento da velocidade nas camadas inferiores e superiores, respectivamente. A diminuição é causada pela aplicação do método DESA que ao retirar água do escoamento retira também quantidade de movimento juntamente com o fato de que o lançamento forma uma barreira que dificulta a passagem do escoamento. E o aumento é causado pelo volume de água que retorna ao final do campo próximo e por retornar com velocidade igual a zero se espalha em todas as direções. Como o volume é alto, a velocidade atingida pela pluma na superfície em contra fluxo é maior do que a velocidade do escoamento ambiente.

Na Figura 63 é possível verificar a presença do jato no campo afastado a partir do comportamento do escoamento ambiente: a presença de fluxo na direção do jato (arraste); a célula de recirculação a montante do lançamento, causado pela adição da água de diluição ao final do campo próximo; fluxo do jato sendo defletido pela velocidade da circulação hidrodinâmica. Este comportamento consegue ser visualizado somente por conta da aplicação

do acoplamento dinâmico, não sendo possível a visualização destes processos no acoplamento nulo ou passivo.

Na Figura 62B nota-se que o ambiente apresenta uma leve estratificação, e desta forma, o perfil logarítmico de velocidades é alterado nos 2,5 m superficiais da coluna d'água que apresentam velocidades superiores às velocidades no equilíbrio anterior antes ao lançamento. Este comportamento se deve ao fato de que a velocidade do escoamento ambiente se soma às velocidades provenientes do fluxo de água adicionado ao final do campo próximo.

Comparando-se os resultados deste teste com as diferentes formas de acoplamento nota-se que o lançamento gera uma estratificação no ambiente independente da forma do acoplamento (Figura 59 e Figura 62).

Os resultados do CorTIME informam que, para este teste, o escoamento do campo próximo foi classificado como MU6, que corresponde a um lançamento em um ambiente sujeito a um forte escoamento ambiente. A configuração do lançamento é hidrodinamicamente instável pois, o fluxo de quantidade de movimento é muito forte quando comparado ao efeito estabilizador do fluxo de flutuabilidade (AKAR; JIRKA, 1991). E apesar do ambiente apresentar estratificação após a inserção dos efluentes, esta estratificação é fraca com relação as condições de descarga e assim não é importante dinamicamente, e a descarga irá se comportar como se estivesse em um ambiente uniforme.

A seguir apresentam-se os campos de velocidades em planta das camadas de superfície, meio e de fundo do canal. Com esta visualização é possível verificar a intensidade e extensão da área que sofre influência do aporte dos efluentes.

Na Figura 64, observa-se no campo de velocidades com um aumento de velocidade a jusante do lançamento e uma diminuição da velocidade a montante do mesmo. Isto é causado pela soma de três fatores: a velocidade do ambiente; a pluma alcança a superfície com quantidade de movimento e/ou flutuabilidade (*surface impingement*) causando o espalhamento horizontal na superfície e o aporte da vazão de água retirada do ambiente pelo processo de arraste no final do campo próximo. Conforme explicado anteriormente este aporte ocorre sem considerar a direção da velocidade da hidrodinâmica do corpo receptor, sendo distribuído para todas as direções. A parte que vai em contra fluxo diminui a velocidade a montante do lançamento e a que vai na direção da hidrodinâmica local se soma à velocidade ambiente e a velocidade do espalhamento horizontal, aumentando a mesma a jusante do

lançamento. Conforme apresentado no caso teste 5 do acoplamento nulo e passivo, este comportamento de *surface impingement* deve-se ao número de Froude do ambiente.

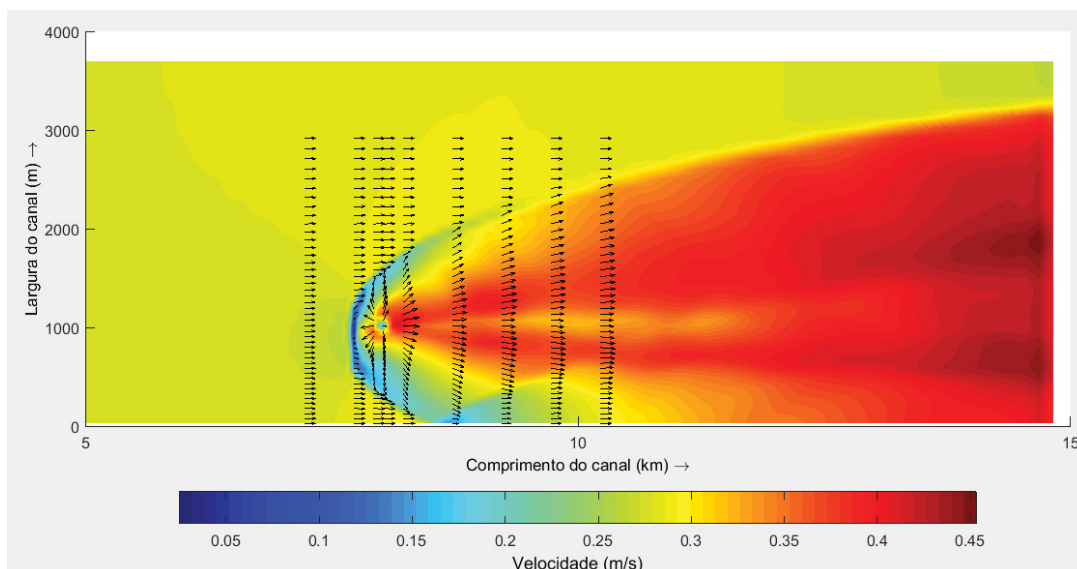


Figura 64 – Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 5) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 400 \text{ m}$.

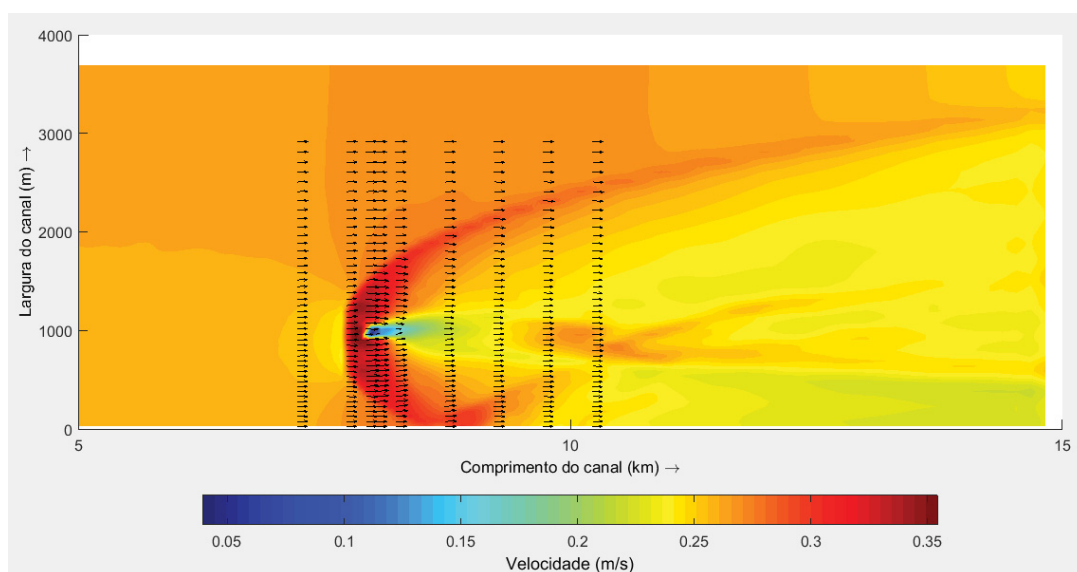


Figura 65 – Velocidades na camada do meio do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 5) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 400 \text{ m}$.

Na camada do meio do canal apresentada na Figura 65, a região que apresenta aumento na intensidade da velocidade não fica restrita a interface pluma-escoamento ambiente, passando a ocupar a área circundante ao lançamento com exceção da região a jusante do

mesmo localizada no eixo do lançamento. Nesta região, a área que apresenta diminuição de velocidade é menor do que a da camada de fundo.

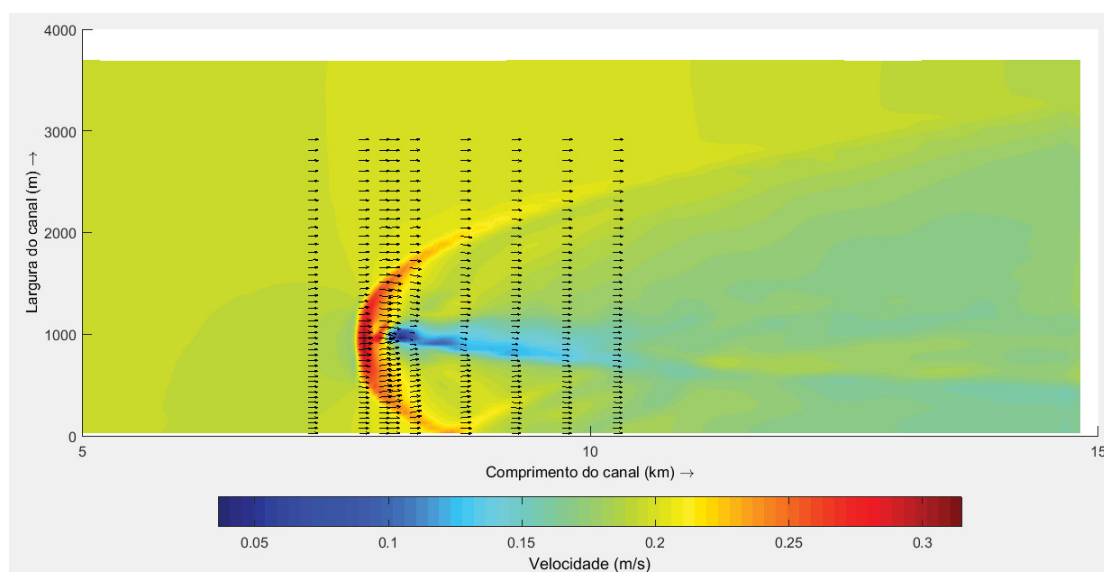


Figura 66 - Velocidades na camada de fundo do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 5) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$

Na camada de fundo do canal, região mais próxima ao lançamento, percebe-se que há um acréscimo na magnitude da velocidade a montante e uma redução a jusante do mesmo (Figura 66). Este comportamento é resultante da interação entre o escoamento ambiente e o jato considerando-se a metodologia do acoplamento dinâmico.

4.2.7 Caso teste 6

Neste caso teste um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ é feito em um escoamento ambiente de $0,11 \text{ m/s}$. Este grande lançamento em um ambiente com velocidades baixas gerou resultados distintos dos demais casos testes, tanto no acoplamento nulo e passivo, como no acoplamento dinâmico.

4.2.7.1 Acoplamento nulo e passivo

No acoplamento passivo o local de finalização do campo próximo, que ocorreu na maior parte do tempo nas coordenadas locais $M = 125$ e $N = 25$ (coordenadas da linha central da pluma), correspondendo as coordenadas globais $x \cong 8000 \text{ m}$ e $y \cong 1250 \text{ m}$. Nos demais casos testes as coordenadas locais do final campo próximo ocorriam em $M = 126$ e $N = 20$ ($x \cong 8040 \text{ m}$ e $y \cong 967 \text{ m}$).

Estas coordenadas são definidas pelo CORMIX e por se tratar de casos em regime permanente elas permanecem, em quase sua totalidade, fixas no mesmo ponto.

Na Figura 67 observa-se que a seção transversal $M=80$ apresenta um perfil logarítmico sem a influência do lançamento, assim como observa-se que os perfis verticais de velocidade a montante (A) e a jusante (B) do lançamento têm comportamentos distintos.

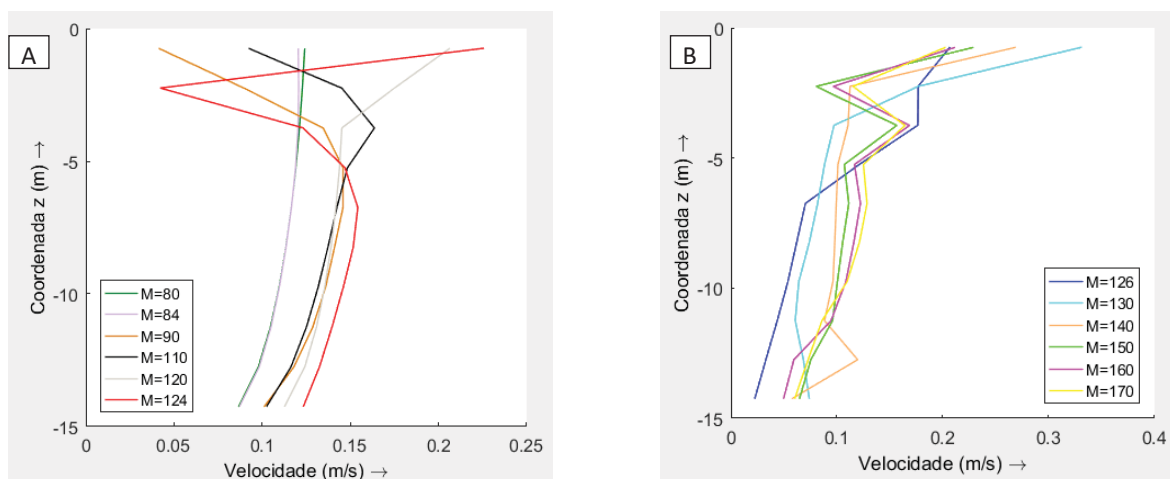


Figura 67 - Perfis verticais de velocidade (A) a montante do lançamento e (B) a jusante do lançamento ao longo do eixo do ponto de lançamento ($N=25$) para o caso teste 6 com acoplamento passivo. O lançamento é feito na meia camada superior da coluna d'água em $M=125$.

Na região a montante do lançamento verifica-se que as velocidades na camada inferior da coluna d'água apresentam velocidades superiores ao observado no perfil logarítmico da seção transversal $M=80$, enquanto que na camada superior as velocidades têm comportamento variado, diminuindo em seções a montante mais distantes do lançamento e aumentando nas seções mais próximas à descarga. Já na região a jusante do lançamento (Figura 67B) as velocidades na camada inferior da coluna d'água nas seções transversais mais próximas ao mesmo apresentam-se reduzidas quando comparadas ao perfil logarítmico da seção $M=80$, enquanto as mais distantes apresentam velocidades aproximadamente similares à observada na situação sem o lançamento. Na camada superior da coluna d'água, de modo geral, as velocidades aumentam nas camadas próximas à -5 m de cota batimétrica, reduzindo à aproximadamente -2 m para depois aumentar novamente.

Este comportamento pode ser entendido observando o perfil longitudinal ao longo do eixo aonde ocorre o lançamento desde a seção transversal $M=80$ até $M=170$, 2250 m a montante e a jusante do lançamento (Figura 68) e os perfis transversais da seção transversal $M=130$ (Figura 69) e $M=150$ (Figura 70).

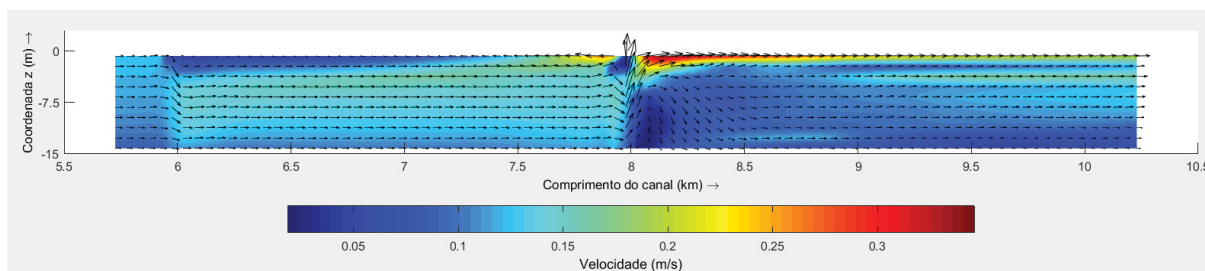


Figura 68 – Perfil longitudinal de velocidades ao longo do eixo onde ocorre o lançamento (N=25) entre as seções transversais M=80 e M=170. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano xz. Escala horizontal dos vetores: 1 m/s = 300 m e escala vertical: 30 vezes maior.

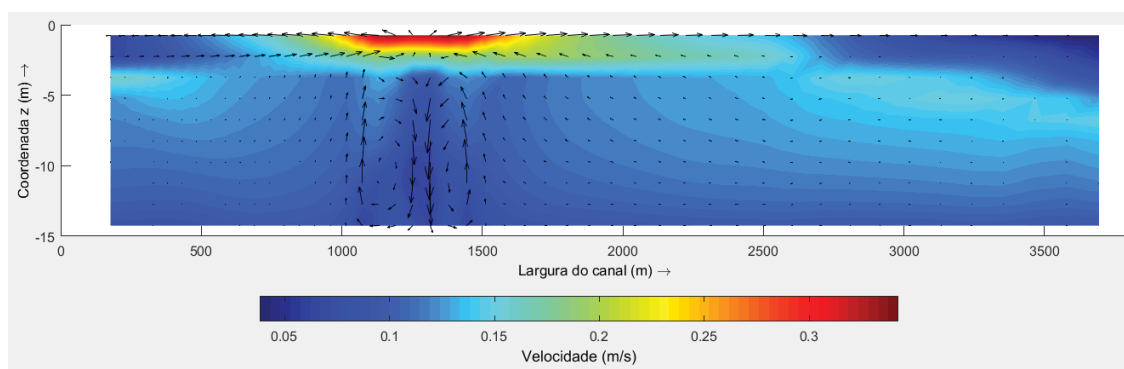


Figura 69 – Velocidades nas seções transversais a 250 m (M=130) a jusante do ponto de lançamento de 40 m³/s para o acoplamento passivo no caso teste 6. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: 1 m/s = 500 m e escala vertical: 50 vezes maior.

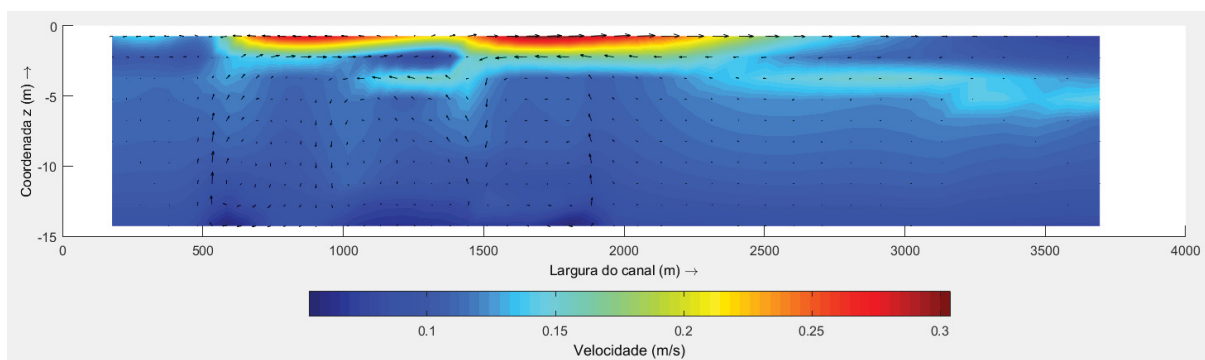


Figura 70 - Velocidades nas seções transversais a 1250 m (M=150) a jusante do ponto de lançamento de 40 m³/s para o acoplamento passivo no caso teste 6. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: 1 m/s = 500 m e escala vertical: 50 vezes maior.

A baixa velocidade do escoamento ambiente permite que a pluma de efluentes se espalhe na superfície em todas as direções (*buoyant spreading*) atingindo uma distância de 2250 m ao longo do comprimento do canal tanto a jusante como a montante do lançamento e na lateral ocupando quase toda a largura do canal. Este grande espalhamento reflete o

comportamento do escoamento baseado na análise do número de Froude do ambiente, $F_a = 0,01$, para este caso teste.

Neste caso teste também são observadas as células de circulação lateral, porém não há simetria como nos casos testes anteriores. Na Figura 68 observa-se que o espalhamento horizontal da pluma a montante do lançamento vai até antes de 6000 m, onde o perfil vertical apresenta-se sem modificações. Analisando-se ainda a Figura 68 em conjunto com a Figura 69 e Figura 70 verificam-se que o comportamento dos perfis verticais de velocidade, tanto antes como depois do lançamento, são causados pelas células de circulação lateral que aumentam ou diminuem as velocidades ao longo da vertical.

Com relação a magnitude da velocidade induzida, observa-se que o lançamento gera alterações significativas com relação às velocidades da base de comparação deste caso teste, como pode ser observado na Figura 71. Como a camada da superfície é a que apresenta as maiores alterações, apresenta-se a velocidade induzida nesta camada.

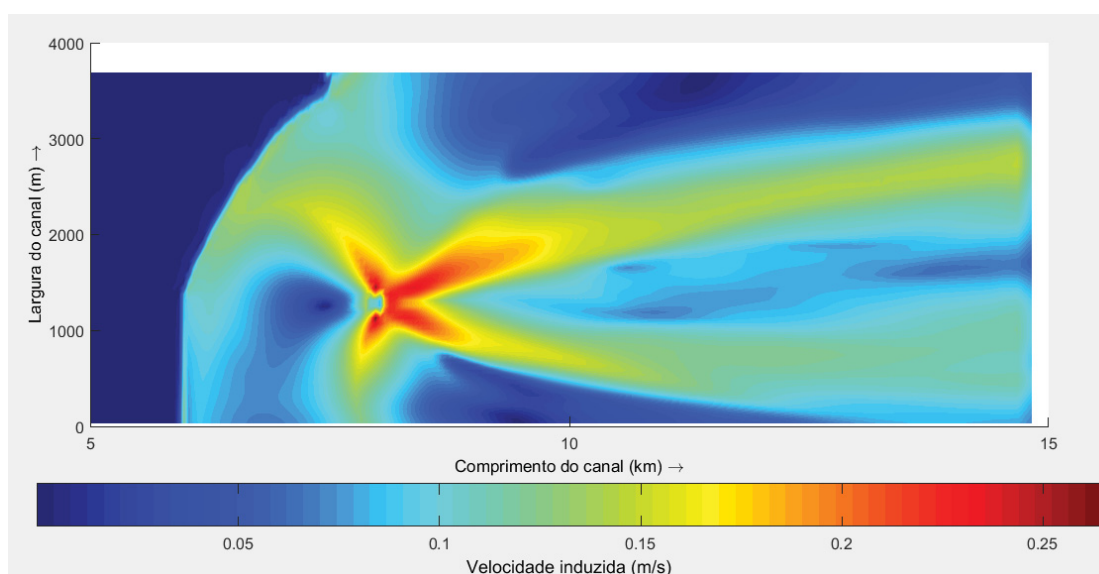


Figura 71 - Diferença entre as velocidades da base de comparação e as velocidades do caso teste 6 na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento passivo.

Neste caso teste verifica-se que velocidades induzidas significativas se estendem por uma grande área, tanto a montante como a jusante do lançamento.

4.2.7.2 Acoplamento dinâmico

Assim como no acoplamento passivo, o campo próximo neste caso teste ocorre nas coordenadas locais $M=125$ e $N=25$.

Os perfis verticais de densidade deste caso teste são similares ao caso teste anterior, de modo que se optou por não apresentar os mesmos em uma figura.

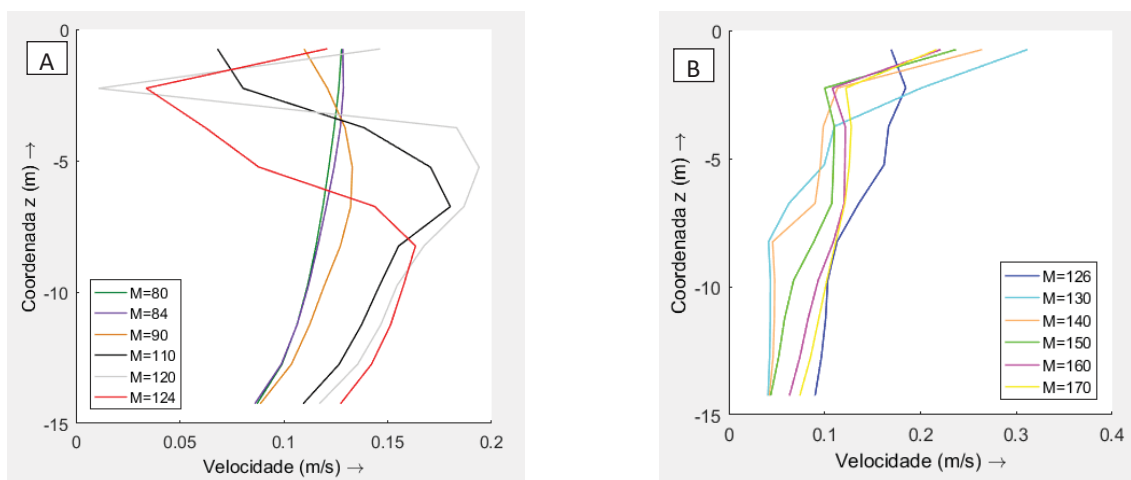


Figura 72 – Perfis verticais de velocidade (A) a montante do lançamento e (B) a jusante do lançamento ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=25) para o caso teste 6 com acoplamento dinâmico.

Para este caso teste os perfis verticais de velocidade são apresentados na Figura 72 separados entre perfis a montante e a jusante do lançamento, para auxiliar na compreensão do comportamento dos mesmos. Observa-se que devido a baixa velocidade do escoamento ambiente a pluma alcança grande extensão, assim como a sua influência sobre a hidrodinâmica do canal, pois somente a 2200 m ($M=80$) a montante do lançamento o perfil logarítmico permanece igual ao imposto na condição contorno. Nos perfis adjacentes ao lançamento nota-se que, próximo ao fundo as velocidades aumentam, reduzindo a partir do meio do canal até a cota batimétrica de -2 m, para depois aumentar novamente (Figura 72A). Este comportamento pode ser explicado devido ao fato de que a água que retorna da aplicação do método DESA funciona como um obstáculo ao escoamento fazendo com o que mesmo se desvie para o fundo do canal. Este mesmo volume adicionado na meia camada superior se espalha em todas as direções e quando se desloca em contra fluxo na superfície, próximo ao lançamento alcança velocidades superiores à velocidade ambiente aumentando seu valor, mas a medida que se afasta do lançamento vai perdendo força até que se equilibra com a velocidade ambiente. Neste instante não há mais o espalhamento superficial e o fluxo submerge formando uma célula de circulação, como observado na Figura 73.

A jusante do lançamento os perfis têm comportamento semelhante, apresentando um aumento linear indo do fundo do canal até a superfície (Figura 72B). O espalhamento horizontal da pluma é responsável tanto pelo aumento da velocidade na superfície como quanto pela diminuição no fundo.

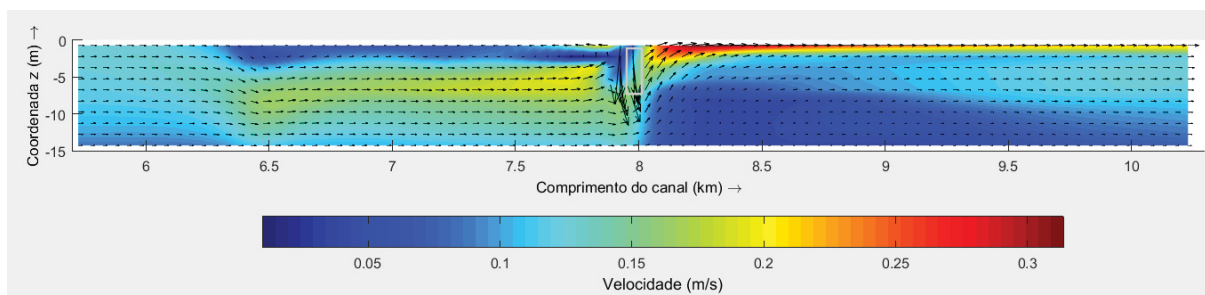


Figura 73 - Velocidades da seção longitudinal que contém os pontos de retorno de água retirada pelo arraste (□) (N=25) geradas por um lançamento de 40 m³/s (caso teste 6) utilizando o acoplamento dinâmico, desde 220 m a montante do lançamento (M=80) até 2300 m a jusante (M=170). Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: 1 m/s = 200 m e escala vertical: 30 vezes maior.

A partir da Figura 73 pode-se visualizar a extensão das alterações induzidas pelo lançamento ao longo da profundidade e do eixo longitudinal que contém o ponto de retorno da água retirada do ambiente pela aplicação do método DESA.

A seguir apresentam-se as distribuições de velocidades nas camadas de superfície, meio e fundo para analisar a extensão das alterações na hidrodinâmica no plano xy.

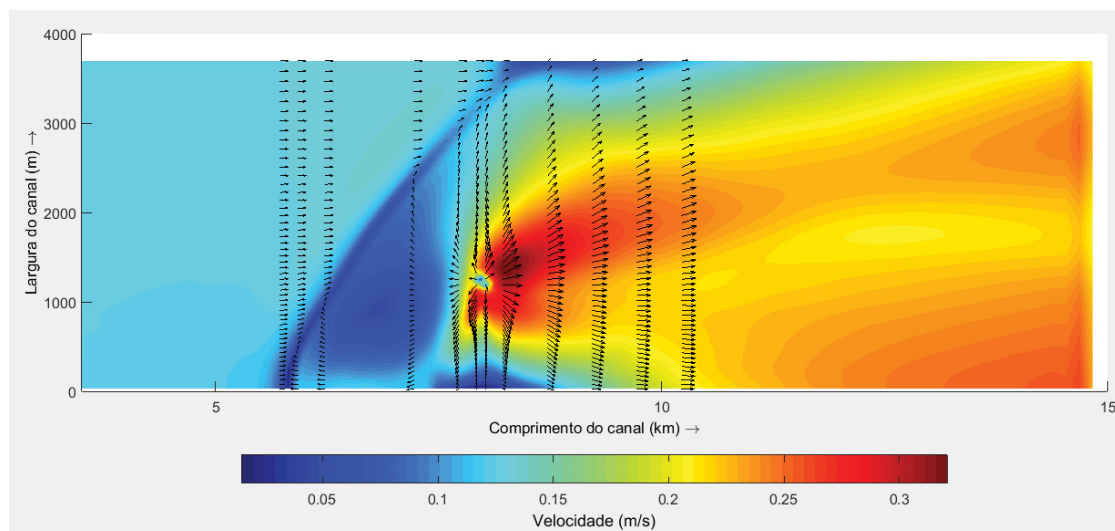


Figura 74 - Velocidades na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de 40 m³/s (caso teste 6) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=80, 84, 90, 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: 1 m/s = 700 m.

Na camada de superfície, Figura 74, visualiza-se o espalhamento horizontal da pluma alterando a direção do fluxo em várias seções transversais a montante do lançamento, assim como o escoamento deslocando-se horizontalmente em todas as direções no ponto de retorno da água retirada do ambiente.

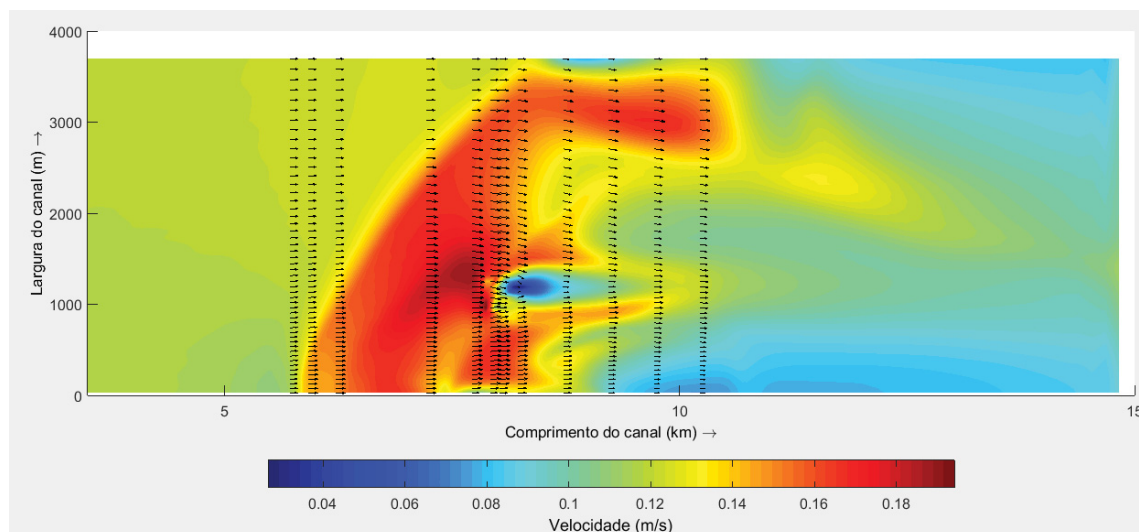


Figura 75 - Velocidades na camada do meio do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 6) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=80, 84, 90, 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 700 \text{ m}$.

Nas camadas do meio e do fundo do canal, Figura 75 e Figura 76, respectivamente, visualiza-se a grande extensão das alterações na hidrodinâmica, chegando a gerar modificações em toda a largura do canal e com incrementos de velocidade a montante e redução a jusante do lançamento.

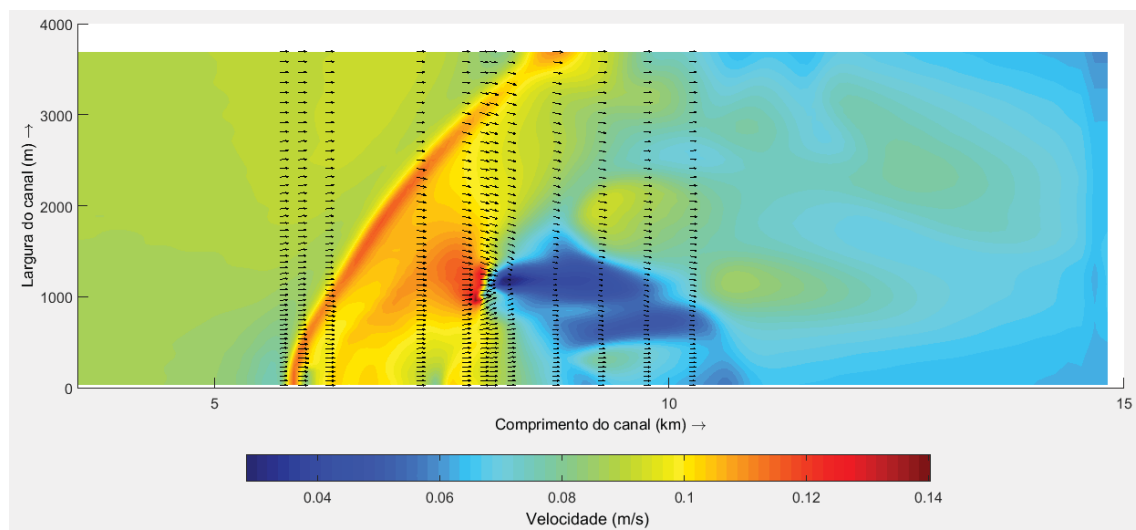


Figura 76 - Velocidades na camada de fundo do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (caso teste 6) utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=80, 84, 90, 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 1000 \text{ m}$.

Comparando com os resultados obtidos com o acoplamento passivo, verifica-se que este acoplamento também gera modificações significativas, porém estas ficam mais restritas

às camadas próximas a superfície, enquanto que o acoplamento dinâmico as alterações relevantes são observadas ao longo de toda a coluna d'água, como se observa na Figura 77, que apresenta a distribuição de velocidades na seção transversal a 300 m ($M=130$) do lançamento.

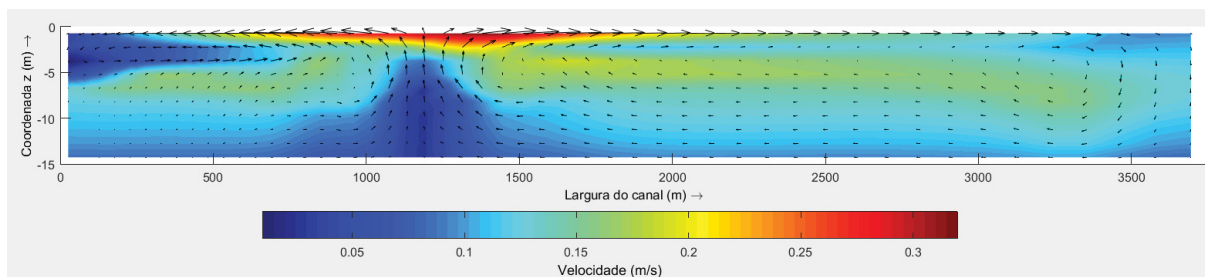


Figura 77 - Velocidades nas seções transversais a 300 m ($M=130$) a jusante do ponto de lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ para o acoplamento passivo no caso teste 6. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetos no plano yz. Escala horizontal dos vetores: $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$ e escala vertical: 30 vezes maior.

4.2.8 Análise de sensibilidade

Neste item apresentam-se resultados referentes a testes realizados para a avaliação da sensibilidade do acoplamento dinâmico.

Conforme descrito na metodologia, a análise de sensibilidade com relação a resolução da grade foi realizada somente com o caso teste 1 sendo apresentados os resultados referentes a teste utilizando uma grade refinada ($25\text{m} \times 25\text{m}$), na região próxima ao local do lançamento e posteriormente uma grade mais grosseira ($100\text{m} \times 100\text{m}$).

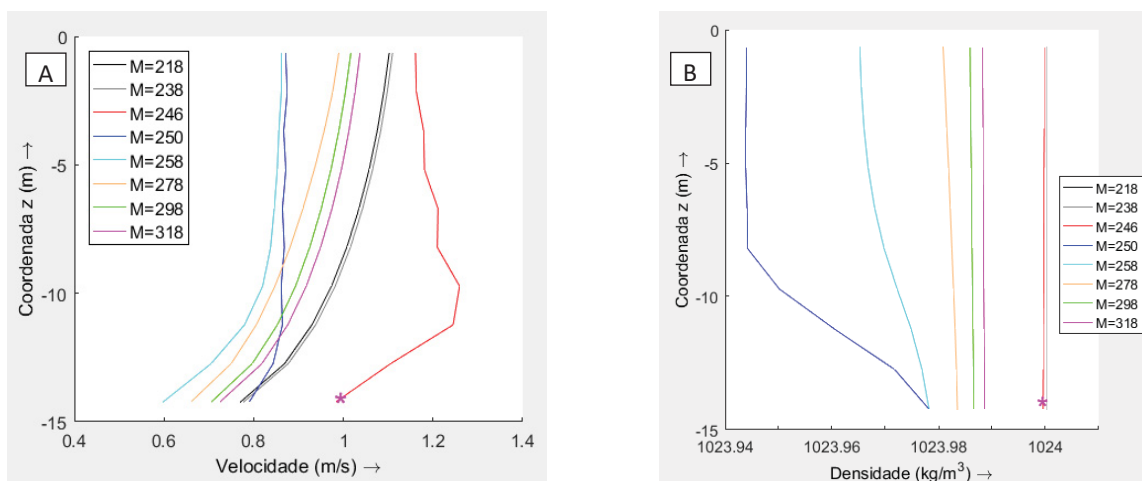


Figura 78 – Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento ($N=39$) nas seções transversais $M = 218, 238, 246, 250, 258, 278, 298$ e 318 para o caso teste 1 com o acoplamento dinâmico e grade refinada. O local do lançamento está indicado por (*).

Na Figura 78 os perfis de densidade sofrem alterações muito sutis, uma redução na ordem de 10^{-2} kg/m^3 , quando comparado com os resultados obtidos com a grade normal

(Figura 31), entretanto os perfis de velocidade apresentam uma maior diferença na região aonde ocorre o lançamento e o acoplamento dinâmico, nas seções transversais M=246 e 250, respectivamente. Somente os perfis de velocidade a montante da descarga de efluentes são indiferentes à resolução da grade.

Na seção M=246, aonde ocorre o lançamento, há um aumento da velocidade em média de 0,2 m/s enquanto que na seção M=250, aonde a água retirada pelo processo de arraste é retornada ao sistema, há uma redução da velocidade de magnitude similar ao aumento na outra seção. Desta forma, as alterações ocorrem localmente não apresentando reflexos significativos nas seções a jusante, neste teste.

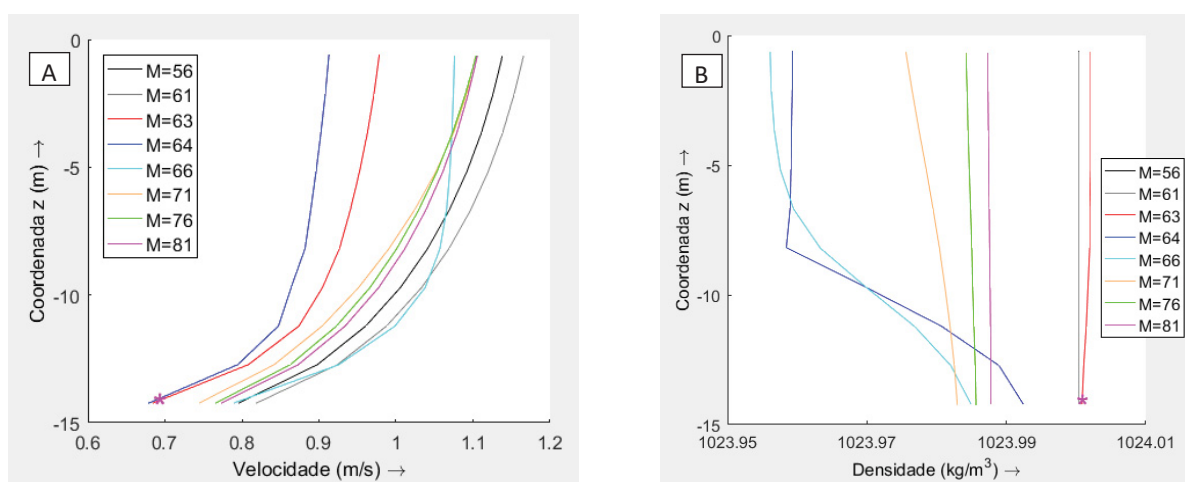


Figura 79 – Perfis verticais de velocidade (A) e densidade (B) ao longo do eixo do ponto de lançamento (N=11) nas seções transversais M = 56, 61, 63, 64, 66, 71, 76 e 81 para o caso teste 1 com o acoplamento dinâmico e a grade grosseira. O local do lançamento está indicado por (*).

Verifica-se pela análise dos perfis verticais de velocidade e densidade (Figura 79), que a baixa resolução da grade faz com que o acoplamento dinâmico seja pouco sentido, pois o campo próximo em sua totalidade acaba ficando menor do que uma célula do campo afastado.

De acordo com Bleninger (2006) é necessário ter uma resolução mínima da grade para distribuir os resultados do campo próximo nas células da grade do campo afastado, sendo necessários, ao menos, 6 a 8 células para resolver a pluma. O que para o domínio simplificado que possui um difusor de 100 m daria células de aproximadamente 17 m ($= L_D / 6$) na região do campo próximo. Entretanto, utilizou-se na grade normal células de 50 m que, para este teste demonstrou conseguir representar satisfatoriamente a pluma, pois esta dimensão

atende ao teorema de Nyquist¹⁶. A recomendação do autor do uso de uma resolução mínima de 6 a 8 células visa a minimização da difusão numérica. Esta afeta qualquer propriedade do fluido que apresente características advectivas como salinidade, sedimentos, traçadores, entre outros (PEREIRA, 2006).

Analisando-se as concentrações de um traçador conservativo ou salinidade na seção longitudinal que contém o ponto de lançamento nota-se que, na grade normal e na grade refinada, as concentrações estão mais diluídas na grade grosseira seguida pela grade normal devido à difusão numérica. Na Figura 80 demonstram-se resultados referentes à concentração do traçador.

O fato das concentrações apresentarem-se mais diluídas nas grades com discretizações menos densas demonstram que os resultados da análise da dispersão, item a ser apresentado mais adiante, seriam mais acurados com as simulações utilizando a grade refinada. Porém, como em todos os casos testes a área da pluma ao final do campo próximo não ficou menor do que 100 m, optou-se por se utilizar a grade com discretização de 50 m x 50 m na região mais próxima ao lançamento, por ser computacionalmente mais rápida.

¹⁶ O teorema de Nyquist define que a discretização do domínio numérico deve ser pelo menos 2 vezes menor do que o fenômeno que se deseja simular (ROSMAN, 2013).

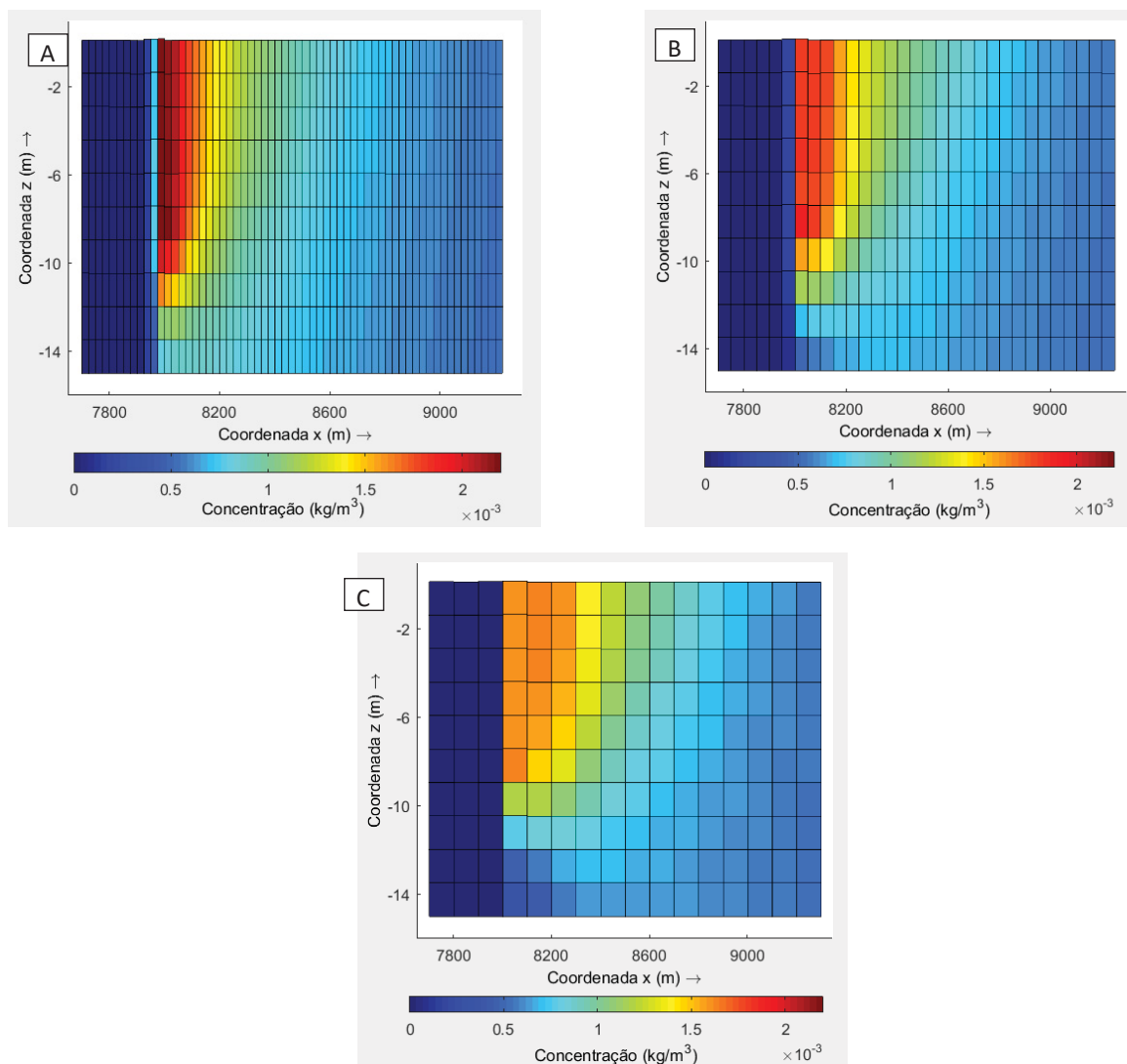


Figura 80 – Distribuição de concentrações de um traçador conservativo na seção longitudinal que contém o ponto de lançamento desde 200 m antes até 1300 m após a descarga de efluentes. (A) Grade refinada, (B) Grade normal e (C) Grade grosseira.

Para a análise de sensibilidade sobre o ponto de retirada das características hidrodinâmicas foram realizados testes preliminares variando-se a localização deste ponto e verificou-se que locais que estão sob a influência direta do lançamento, pontos localizados a jusante da descarga no eixo da mesma, geram resultados fisicamente impossíveis. O sistema não consegue atingir um estado permanente novamente, apresentando um comportamento cíclico onde em um passo de tempo o ambiente está uniforme e no passo de tempo seguinte está estratificado. Para os casos permanentes, pontos localizados a 200 m a montante do lançamento apresentaram resultados coerentes, tendo sido escolhido desta forma o ponto no eixo de lançamento com esta distância.

A análise da sensibilidade do acoplamento dinâmico frente ao intervalo de tempo do acoplamento foi realizada mediante a execução da metodologia utilizando 15, 30, 45 e 180 minutos de passo de tempo.

As execuções do acoplamento dinâmico com os passos de tempo de 15, 30 e 45 minutos não apresentaram diferenças nos resultados, pois todos foram executados para casos em regime permanente. E por se tratar de um regime permanente o teste foi executado com 180 minutos de passo de tempo conforme indicado em Morelissen *et al.* (2013). Com este intervalo de tempo, a descarga de efluentes apresentava descontinuidade como se o lançamento não fosse efetuado de modo contínuo. Isto ocorreu pois, com 180 minutos entre cada execução do CORMIX, a pluma era transportada para fora do domínio devido à alta velocidade do ambiente.

4.3 RESUMO DOS RESULTADOS DOS CASOS EM REGIME PERMANENTE

A seguir apresenta-se um resumo dos resultados obtidos com a aplicação dos diferentes casos testes ao domínio genérico simplificado considerando um escoamento ambiente em regime permanente.

Apesar de terem sido determinadas as velocidades induzidas nas camadas de superfície, meio e fundo do canal, assim como as velocidades promediadas na vertical induzidas, são apresentadas e analisadas somente as velocidades promediadas na vertical induzidas, pois estas fornecem uma visão geral da hidrodinâmica de todo o canal. Desta forma, o termo velocidade induzida será utilizada para representar a velocidade promediada na vertical induzida.

São apresentadas, na Tabela 6, as razões entre as vazões efluente/ambiente, as velocidades efluente/ambiente, a máxima velocidade induzida, e na Figura 81 e na Figura 82, são apresentados respectivamente os gráficos que relacionam a porcentagem da área com velocidade induzida com a velocidade de excedência¹⁷ maior do que 1, 5 e 10% para cada caso teste e cada tipo de acoplamento, e os gráficos que relacionam a porcentagem da área com velocidade induzida com os casos testes. As áreas com velocidade induzida foram calculadas conforme o método apresentado no item 3.3.2.

¹⁷ Define-se velocidade de excedência como sendo a velocidade induzida maior do que um determinado valor da velocidade promediada na vertical média da base de comparação.

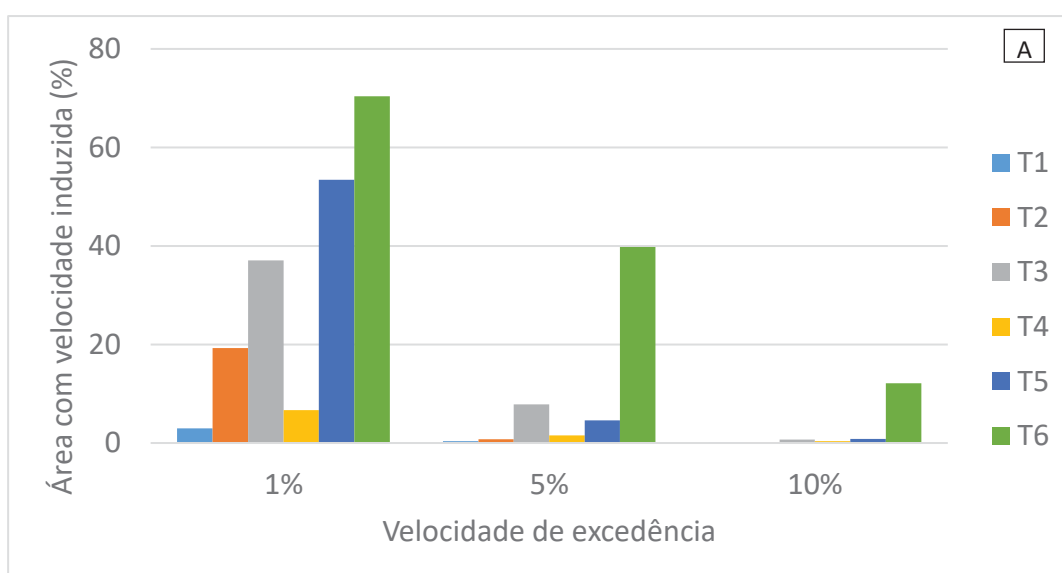
Como os resultados obtidos com o acoplamento nulo e o acoplamento passivo são similares, são apresentados somente os resultados referentes ao acoplamento passivo e o dinâmico.

Tabela 6 - Resumo dos resultados dos casos testes aplicados a um escoamento em regime permanente.

Caso teste	Acoplamento	Q_0/Q_a	u_0/u_a	Máx. vel. Induzida (m/s)
1	Passivo	$6,90 \cdot 10^{-5}$	0	0,02
	Dinâmico		2,33	0,39
2	Passivo	$2,77 \cdot 10^{-4}$	0	0,02
	Dinâmico		9,40	0,1
3	Passivo	$6,13 \cdot 10^{-4}$	0	0,01
	Dinâmico		21,36	0,1
4	Passivo	$7,11 \cdot 10^{-4}$	0	0,06
	Dinâmico		2,49	0,31
5	Passivo	$2,84 \cdot 10^{-3}$	0	0,03
	Dinâmico		10,04	0,23
6	Passivo	$6,29 \cdot 10^{-3}$	0	0,03
	Dinâmico		22,81	0,07

Para o acoplamento passivo o efluente é adicionado sem velocidade, desta forma a razão entre as velocidades é igual a zero.

Verifica-se que a máxima velocidade induzida ocorre com o acoplamento dinâmico independente do caso teste e que as maiores velocidades induzidas ocorrem nos casos testes que possuem a maior velocidade ambiente.



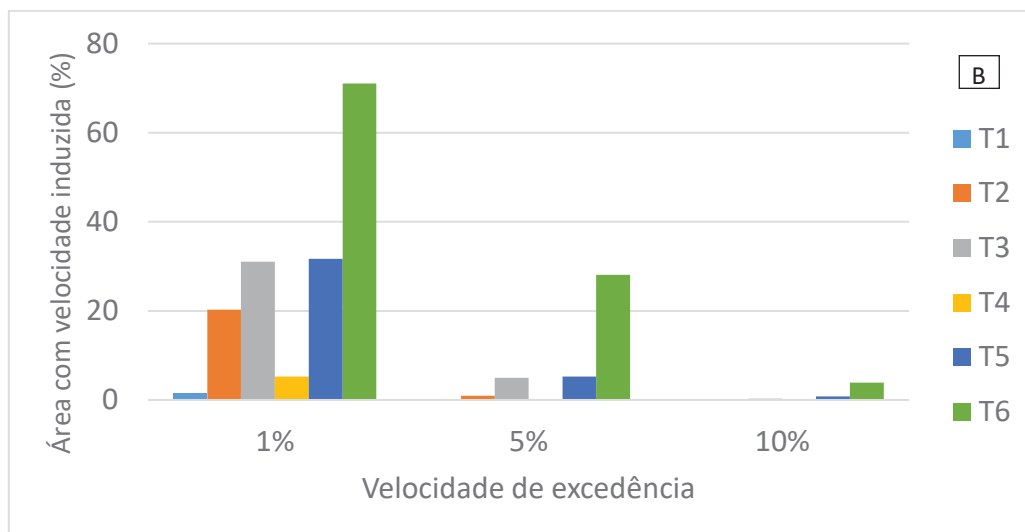
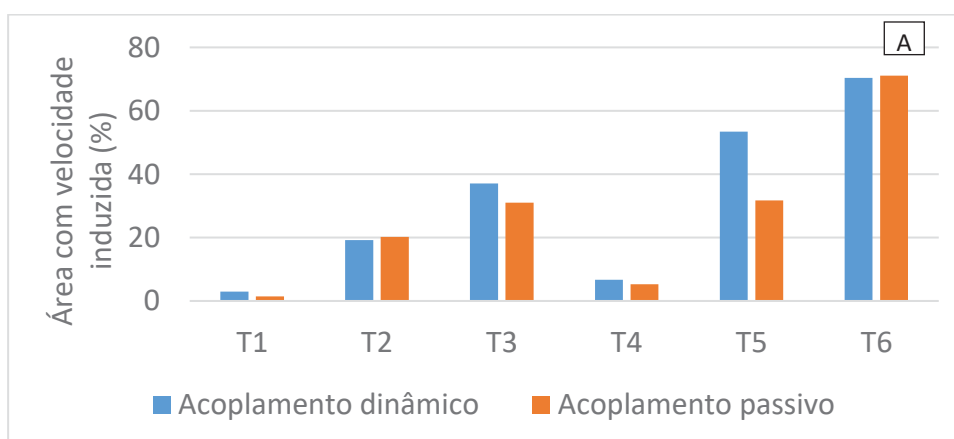


Figura 81 – Gráficos da porcentagem da área com velocidade induzida com relação a velocidade de excedência de 1, 5 e 10% para os diferentes casos testes com (A) acoplamento dinâmico e (B) acoplamento passivo.

Analisando-se os gráficos da Figura 81 nota-se que, de maneira geral, as porcentagens das áreas com velocidade induzida são inversamente proporcionais a velocidade do escoamento ambiente e diretamente proporcionais à vazão dos efluentes independente da forma do acoplamento.

Nota-se ainda que a máxima velocidade induzida não apresenta relação direta com o tamanho da área com velocidade induzida, uma vez que esta sempre ocorre em uma única célula da grade numérica. Entretanto esta está relacionada com a razão entre as velocidades, onde as menores razões: caso teste 1 e 4 resultaram nas maiores máximas velocidades induzidas e nas menores áreas com alteração de velocidade devido aos lançamentos.



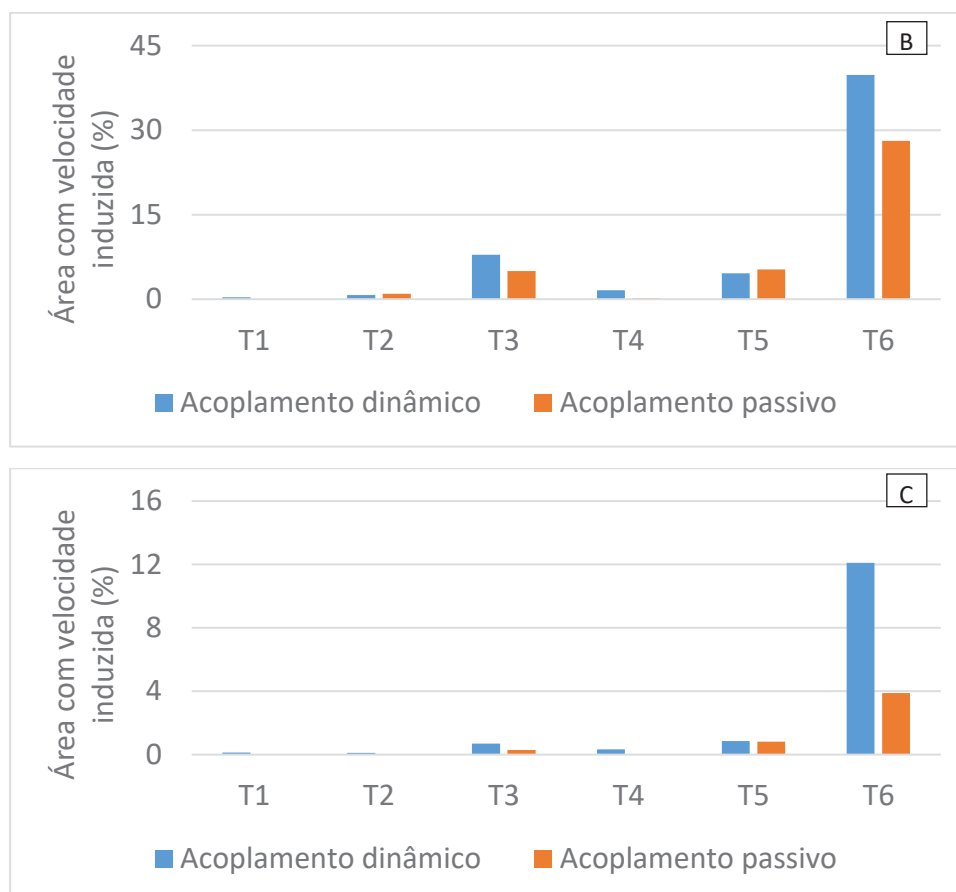


Figura 82 – Gráficos da porcentagem da área com velocidade induzida em função dos casos testes com os diferentes tipos de acoplamento para as velocidades de excedência de (A) 1%, (B) 5% e (C) 10%.

Os gráficos da Figura 82 permitem a visualização da comparação entre as porcentagens das áreas com velocidade induzida obtidas com o acoplamento dinâmico e passivo para cada caso teste e para cada valor analisado de velocidade de excedência.

A análise destes gráficos mostra que na maioria dos casos o acoplamento dinâmico gerou mais alterações na hidrodinâmica ambiente do que o acoplamento passivo e, este para alguns casos testes não apresentou modificações no escoamento ambiente maior do que 5 ou 10%.

Observa-se também que a alta vazão de efluentes é responsável pelas maiores alterações na hidrodinâmica, com exceção do caso teste 4, em que o lançamento é realizado em um ambiente com alta velocidade e deste modo as alterações ficam menores do que um lançamento menor feito em um ambiente com velocidades baixas, caso teste 2 e 3 para a velocidade de excedência de 1% e caso 3 para a velocidade de excedência de 5 e 10%.

As figuras com as velocidades induzidas para cada caso teste são apresentadas no Apêndice F – Velocidades induzidas por camadas para cada caso teste.

4.4 ESTUDO DE CASOS EM REGIME NÃO PERMANENTE

A execução de casos em regime não permanente possibilitou analisar cenários que apresentem características mais similares à maioria dos corpos receptores de efluentes via emissários submersos, as regiões costeiras incluindo também os estuários. Assim como verificar o comportamento do lançamento, sob as suas diferentes formas, em situações aonde a velocidade oscila e apresenta valores próximos a zero, invertendo a direção da corrente pode criar situações com possibilidades de remistura, ou seja, diluição utilizando água com poluentes. Esta situação não está prevista nem implementada nos modelos de campo próximo ou nos acoplamentos nulos ou passivos. Permitiu também averiguar a influência da localização do ponto de retirada dos dados ambientais do campo afastado para o campo próximo e a influência do intervalo de execução entre os modelos sobre o acoplamento, no caso do acoplamento dinâmico.

Desta forma, primeiramente são apresentados os resultados do escoamento ambiente sem o lançamento, situação esta denominada de base de comparação, para depois então serem apresentados os resultados dos acoplamentos nulo, passivo e dinâmico e as diferenças observadas no campo de velocidades ambiente obtida a partir dos diferentes acoplamentos.

4.4.1 Base de comparação

A imposição das condições de contorno apresentadas na Tabela 5 geram um campo de velocidades não permanente, cujo comportamento sem a influência do lançamento dos efluentes é visualizado nos resultados temporais (Figura 83 e Figura 84) e espaciais (Figura 85 e Figura 86).

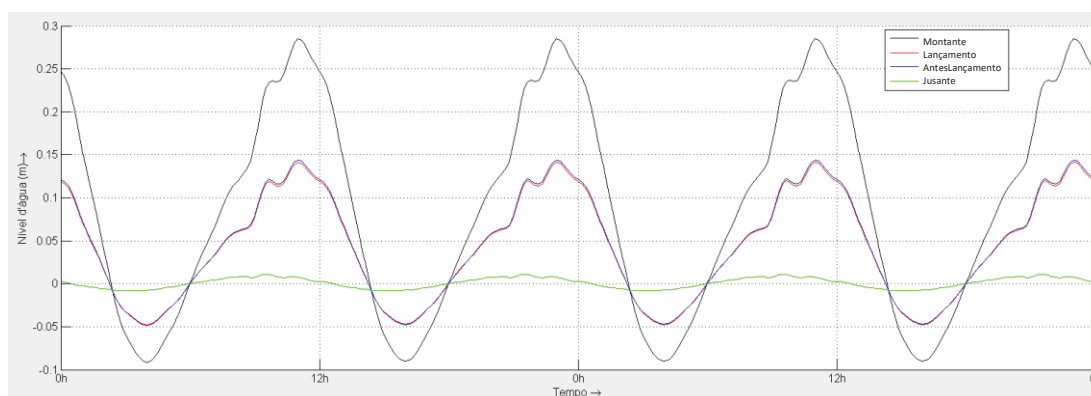


Figura 83 - Elevação do nível d'água (m) ao longo do tempo de execução do Delft3D, obtido nos pontos de observação pela imposição das condições de contorno, sem a presença do emissário (base de comparação).

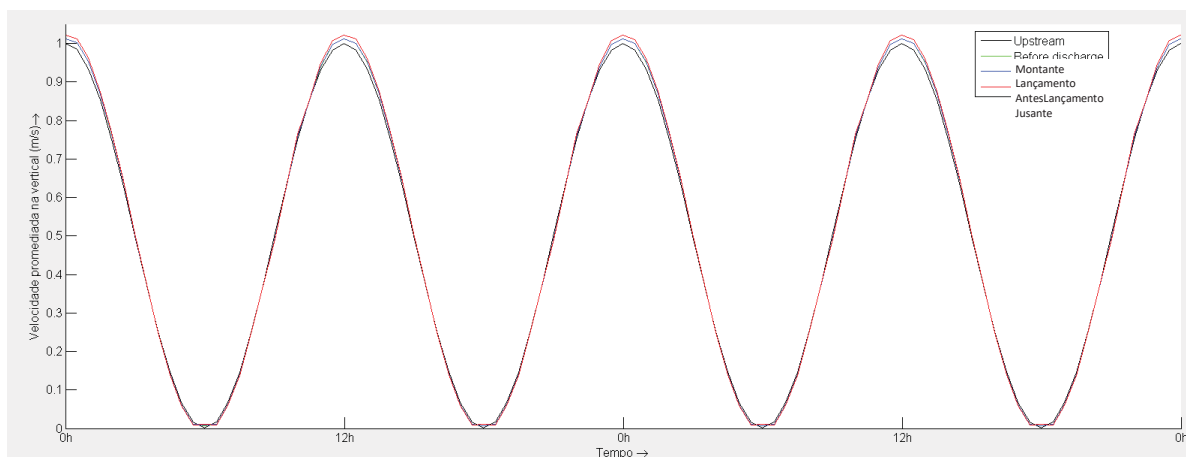


Figura 84 - Velocidade promediada na vertical ao longo do tempo de execução do Delft3D, obtido nos pontos de observação Montante, Lançamento, AntesLançamento, Jusante.

As velocidades oscilaram, ao longo do tempo, entre valores de aproximadamente 1,0 m/s a aproximadamente 0,0 m/s, sendo esta uma variação estacionária, como pode se observar na Figura 84, não havendo atenuações na velocidade ao longo do canal.

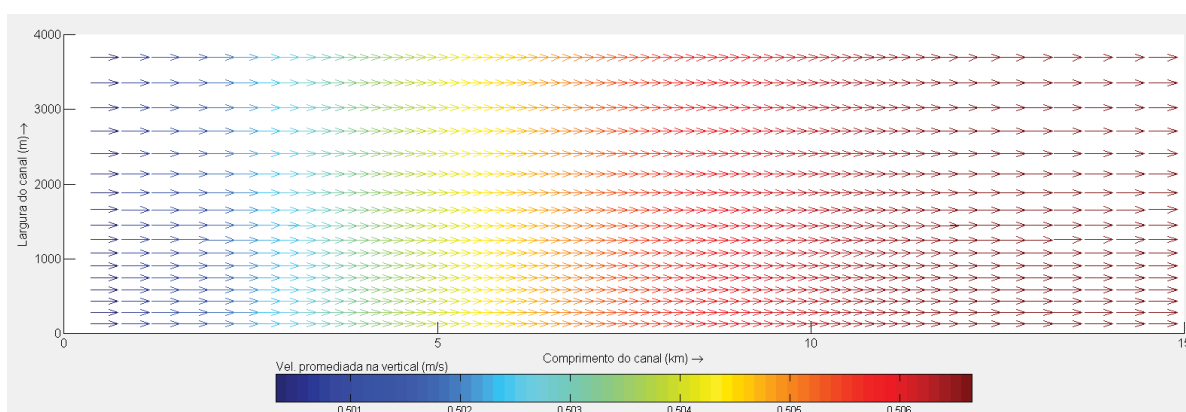


Figura 85 - Campo de velocidades promediadas na vertical com direção de montante para jusante, para o instante de 15 horas após o início da execução do modelo Delft3D.

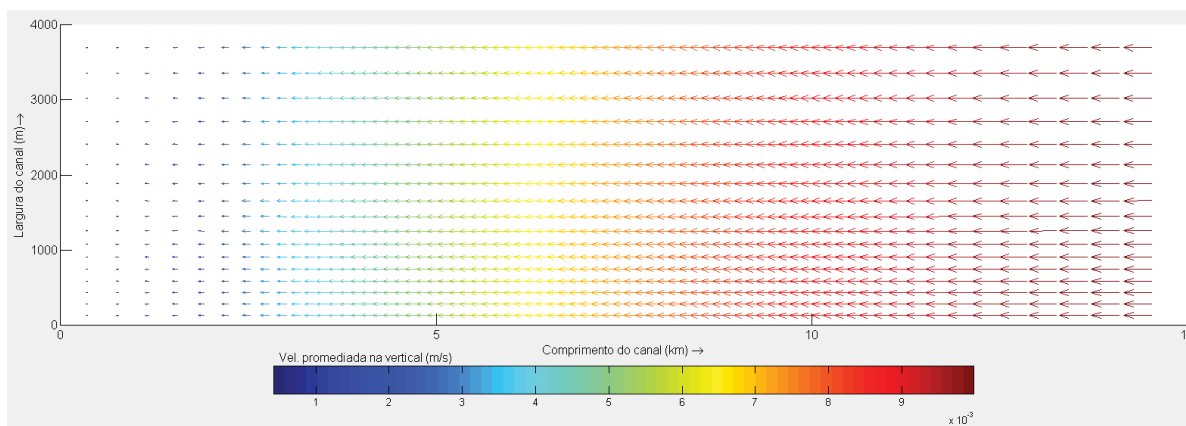


Figura 86 - Campo de velocidades promediadas na vertical com direção de jusante para montante, para o instante de 18 horas após o início da execução do modelo Delft3D.

Analisando-se os resultados temporais e espaciais observa-se que na maior parte do tempo modelado o escoamento ocorre de montante para jusante, invertendo o fluxo somente durante curtos períodos de tempo quando a velocidade promediada na vertical atinge o seu valor mínimo, nos instantes de 6 e 18 horas. Nestes instantes de inversão de corrente as velocidades são muito baixas, na ordem de 10^{-3} m/s e têm duração menor do que o intervalo de gravação dos resultados espaciais, 30 minutos. Ou seja, tanto às 17:30 como às 18:30 o fluxo encontra-se fluindo de montante para jusante. Tal comportamento se deve às condições de contorno impostas que apresentam níveis d'água positivos maiores que duram mais tempo do que os pequenos níveis d'água negativos (Figura 83).

4.4.2 Acoplamento nulo e passivo

Conforme descrito na Metodologia o final do campo próximo gerado pelo lançamento de efluentes em um ambiente com hidrodinâmica em regime não permanente pode variar. Sendo assim, foi escolhido como coordenadas locais para o ponto representativo do final do campo próximo, o ponto mais frequente durante as execuções do CORMIX, as coordenadas locais $M = 126$, $N = 20$ e $K = 0$ (pluma ocupando toda a coluna d'água)¹⁸. Estas coordenadas representam aproximadamente uma distância de 100 metros do ponto de lançamento ($x = 8028$ m e $y = 967$ m).

Já para o acoplamento nulo foram utilizadas as coordenadas locais que representam o ponto médio da linha de difusores, $M = 124$, $N = 20$ e $K = 10$, e em coordenadas globais $x = 7928$ m e $y = 967$ m.

Os instantes escolhidos para a visualização do campo de velocidades foram às 12, 15, 18 e 21 horas após o início da execução do modelo Delft3D, tendo sido eleitos por serem representativos dentro da variação temporal da velocidade (Figura 83). Juntamente com o campo de velocidades para todo o canal foram sobrepostos vetores na região aonde se localiza o emissário e onde há maior variação na velocidade.

Como os resultados do acoplamento nulo e passivo são similares, são apresentados os resultados espaciais somente do acoplamento passivo.

Analisando-se os campos de velocidade em planta em diferentes profundidades verificou-se que as diferenças apresentadas ao longo da vertical devem-se ao fato da imposição de um perfil logarítmico. Desta forma, optou-se por apresentar os resultados do acoplamen-

¹⁸ O lançamento, para o acoplamento passivo, nos casos em regime permanente considerou várias fontes para representar a área da pluma ao final do campo próximo.

to passivo somente como o campo de velocidades promediadas na vertical, cujos valores variam de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 – Variação das velocidades promediadas na vertical ao longo do canal nos instantes 12h, 15h, 18h e 21h.

Instante (h)	Velocidades (m/s)
12	1,002 – 1,02
15	0,501 – 0,506
18	0,001 – 0,01
21	0,484 – 0,498

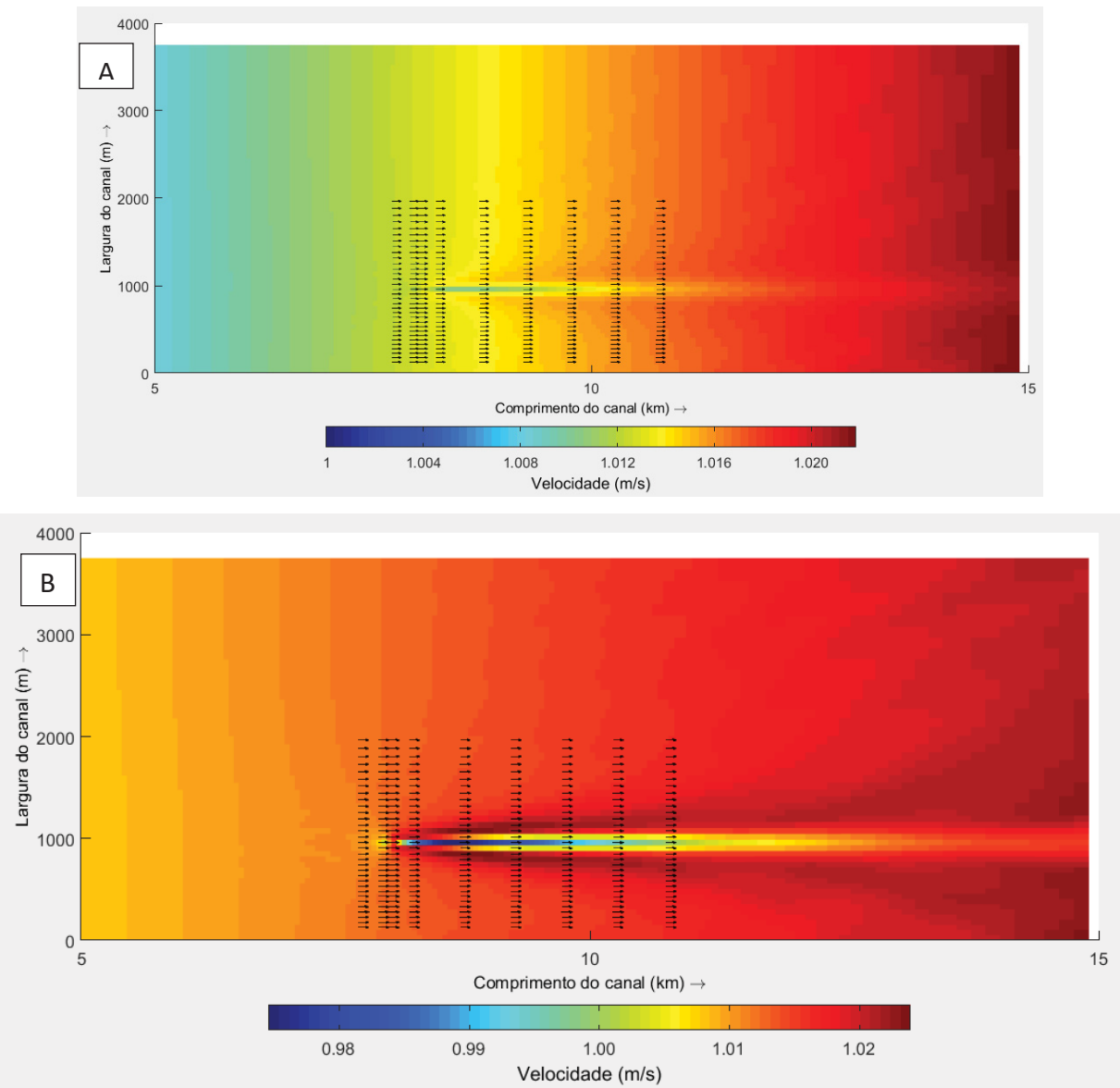


Figura 87 – Velocidades promediadas na vertical 12 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de (A) 3,9 m³/s e (B) 40 m³/s com acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160, 170 e 180. Escala dos vetores: 1 m/s = 100 m.

Após 12 horas de execução do modelo hidrodinâmico, instante em que a velocidade do ambiente alcança seu valor máximo, comparando com os valores da Tabela 7 verifica-se que as velocidades induzidas pelo lançamento via acoplamento passivo são da ordem de 10^{-3} e 10^{-2} m/s para lançamentos de 3,9 e 40 m³/s, respectivamente (Figura 91) e que os vetores não sofrem alteração em sua direção.

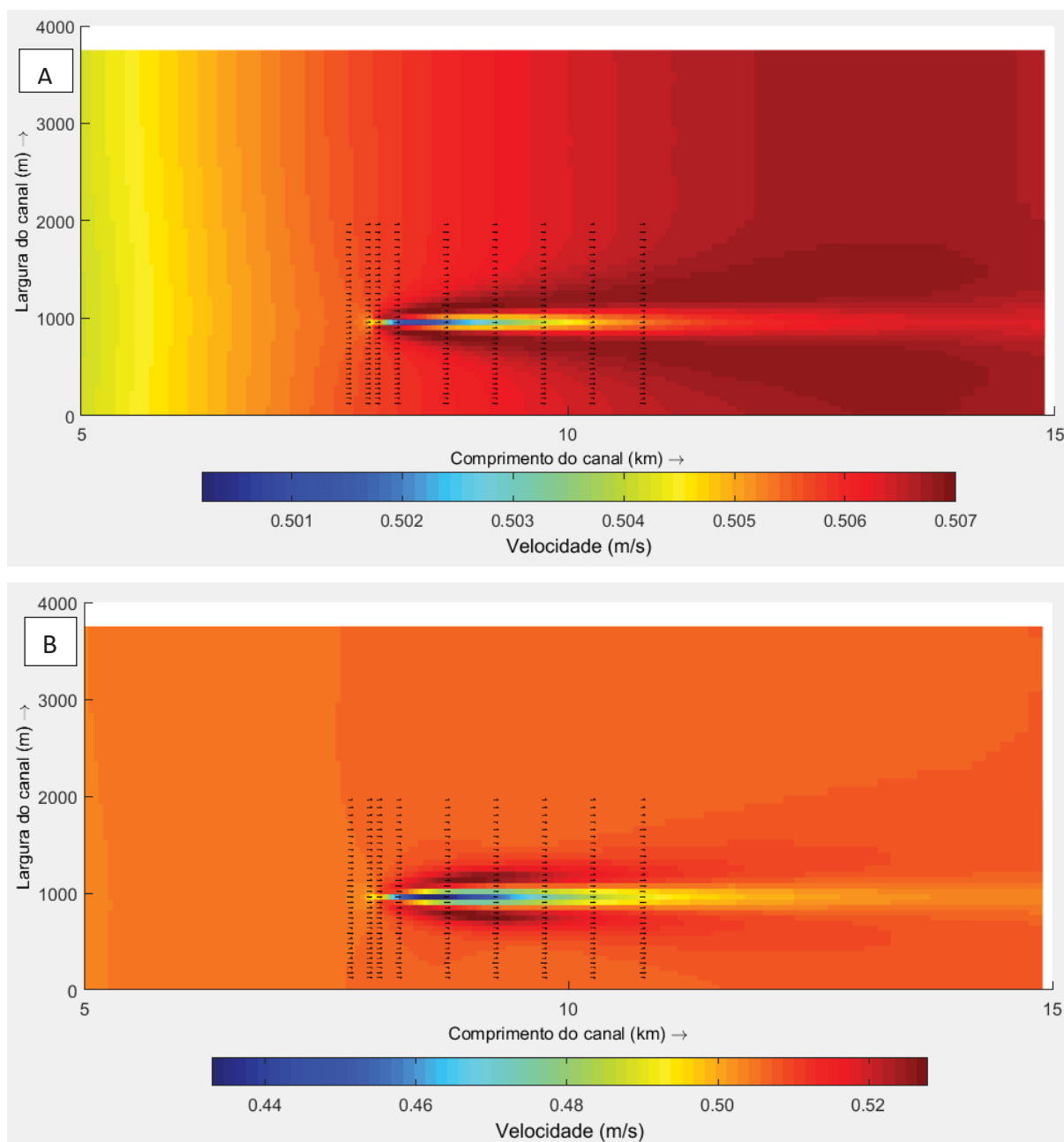


Figura 88 – Velocidades promediadas na vertical 15 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de (A) 3,9 m³/s e (B) 40 m³/s com acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160, 170 e 180. Escala dos vetores: 1 m/s = 100 m.

O instante apresentado na Figura 88, 15 horas de execução do modelo hidrodinâmico, está a meia distância entre uma crista e um vale e, desta forma possui metade da velocidade máxima. A menor velocidade do escoamento ambiente permite que a velocidade induzida pelo lançamento alcance uma área um pouco maior, porém verifica-se que as diferenças na velocidade continuam na ordem de 10^{-3} , 10^{-2} m/s dependendo da vazão de lançamento, havendo uma variação na escala de velocidade de 500% maior para o lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

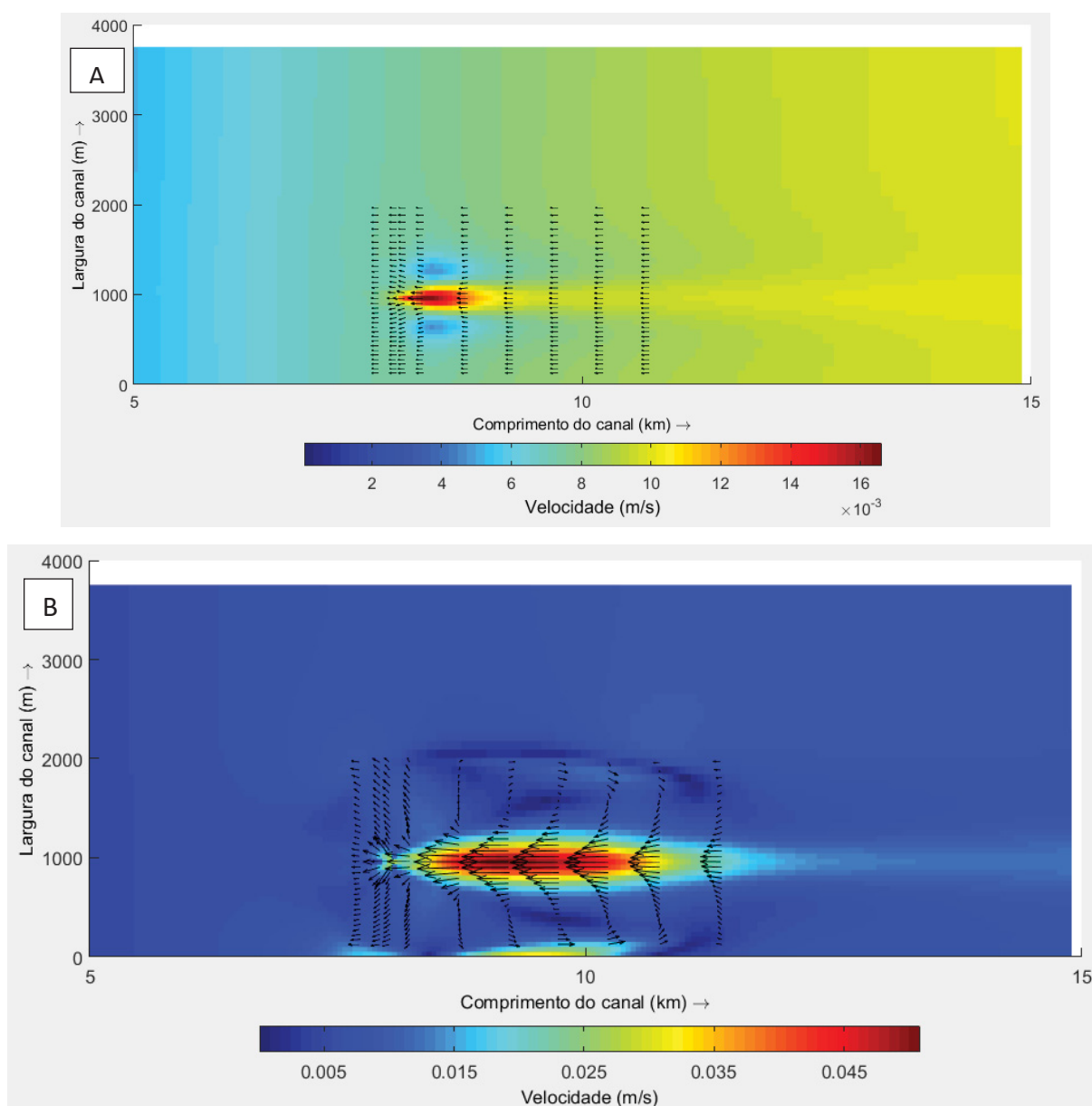
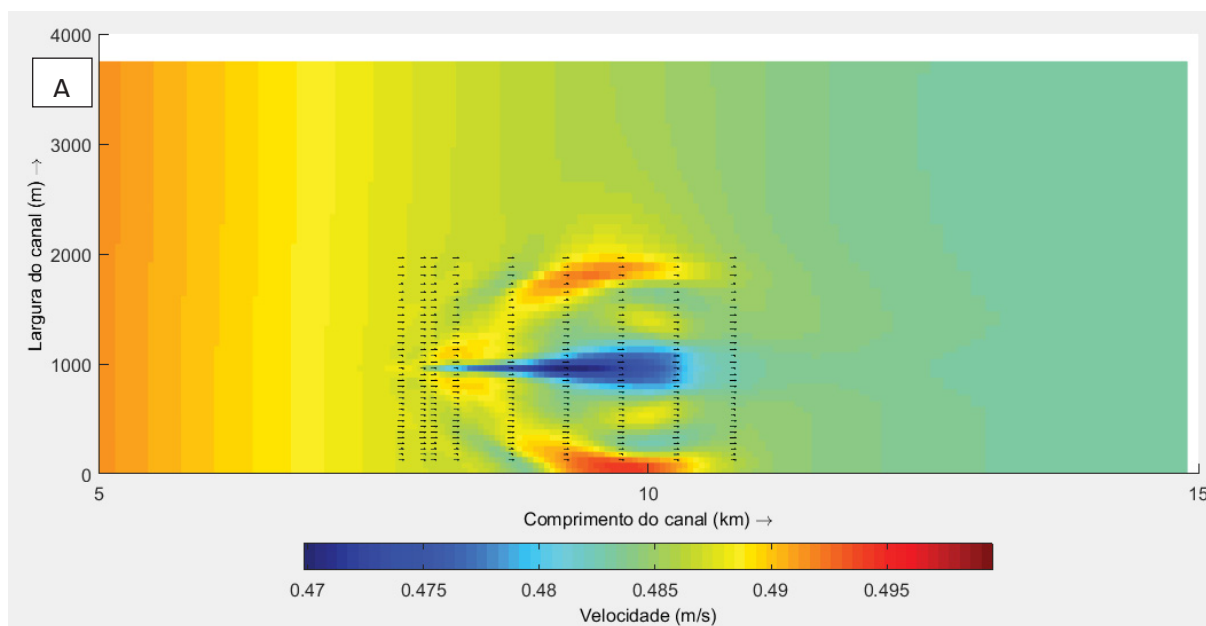


Figura 89 – Velocidades promediadas na vertical 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de (A) $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ e (B) $40 \text{ m}^3/\text{s}$ com acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160, 170 e 180. Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 10000 \text{ m}$.

Na Figura 89, que representa o campo de velocidades promediadas na vertical no instante de menor velocidade ambiente, observa-se que o fluxo vai de jusante para montante para o lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ com pequenas diferenciações (ordem de 10^{-3} m/s) na magnitude dos vetores. E para o lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, o fluxo em quase sua totalidade assume direção montante – jusante apresentando correntes semelhantes a correntes de retorno nas laterais da área com a hidrodinâmica alterada pelo lançamento. Observa-se também, para esta vazão de lançamento, que este escoamento ambiente quase nulo permite que o lançamento induza modificações na direção dos vetores velocidade. Estas modificações puderam ser visualizadas somente por conta da escala aplicada aos vetores.

Percebe-se também que a alta vazão associada à baixa velocidade do escoamento ambiente aumenta a influência do lançamento exercida no campo de velocidades do canal, quando se compara com os outros instantes.

Nos outros instantes não houve modificação dos vetores induzida pelo lançamento, mesmo se alterando a escala dos mesmos. Isto se deve ao fato da velocidade do escoamento ambiente ser dominante nestas situações.



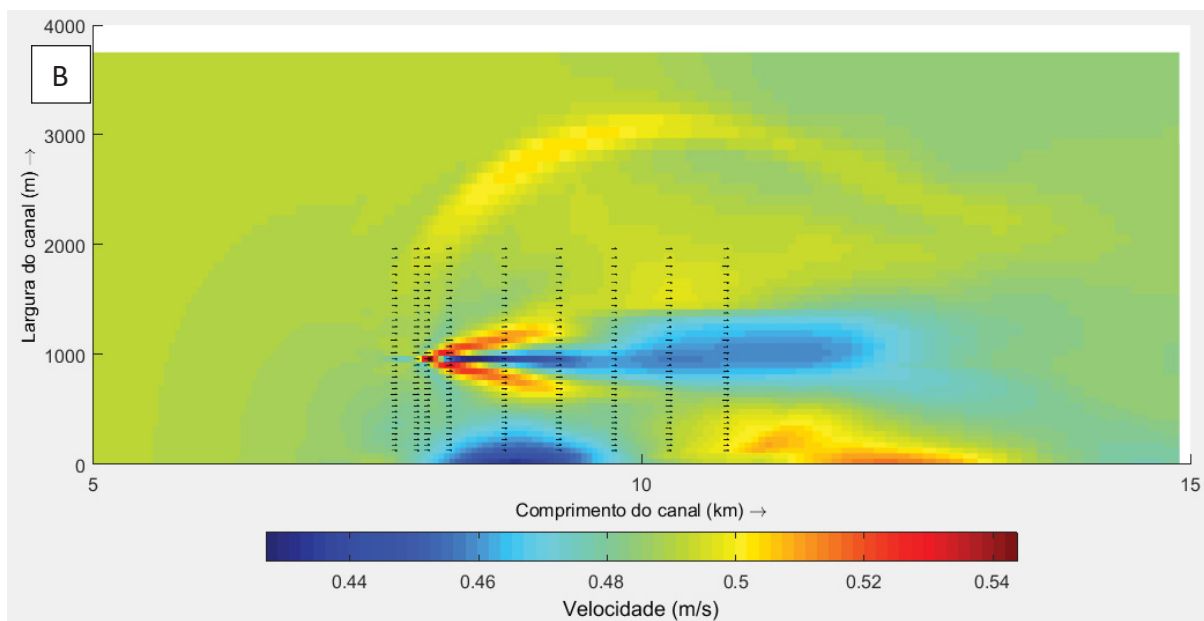


Figura 90 – Velocidades promediadas na vertical 21 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de (A) $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ e (B) $40 \text{ m}^3/\text{s}$ com acoplamento passivo. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160, 170$ e 180 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$.

O campo de velocidades apresentado na Figura 90 representa um instante a meia distância entre vale e crista, situação similar e oposta ao instante de 15 horas (Figura 88) no que tange aos valores das velocidades. Entretanto, o formato da distribuição das velocidades difere, pois no instante de 15 horas há um movimento da hidrodinâmica do canal indo do ponto de maior velocidade para o de menor velocidade, enquanto no instante de 21 horas o movimento é inverso.

Por se tratar de um movimento cíclico, após o instante de 21 horas, o campo de velocidades volta a ter características similares ao instante de 12 horas.

Analisando-se estes resultados para o acoplamento passivo, é possível observar que mesmo com a alta vazão de lançamento, os vetores não sofrem alterações visíveis, com exceção ao instante de menor velocidade ambiente (18 horas), devido ao fato que neste tipo de acoplamento passivo são inseridas somente a carga de efluentes.

4.4.3 Acoplamento dinâmico

Para o acoplamento dinâmico foram executados cenários relativos a baixas e altas vazões dos efluentes conforme apresentado na metodologia, com variações no ponto de retirada dos dados do campo afastado para alimentar o modelo de campo próximo e tam-

bém com variações no intervalo de acoplamento entre os modelos. Os resultados destes testes com estas variações são apresentados no item 4.4.4.

Para estes cenários de execução não houve alteração no escoamento ambiente pois, simula-se um ambiente com escoamento não permanente recebendo um aporte de efluentes, e este sim pode sofrer modificações quantitativas.

4.4.3.1 Baixa vazão de efluentes

Para a descarga de efluentes a uma baixa vazão, $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$, os campos de velocidade em planta para as camadas de fundo, meio e superfície para os instantes de 12, 15 e 21 horas são muito similares entre si. Desta forma, para estes instantes apresenta-se somente os campos de velocidade promediada na vertical.

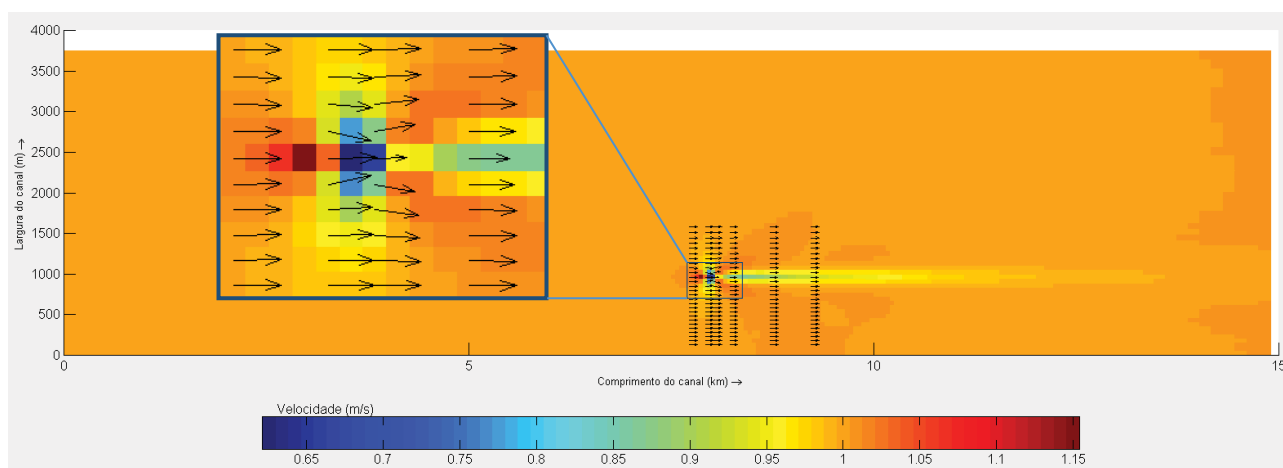


Figura 91 - Velocidades promediadas na vertical 12 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ com acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 120, 124, 126, 130, 140$ e 150 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.

Neste instante, as características são similares ao caso teste 1 do caso em regime permanente, desta forma as alterações induzidas pelo lançamento ficam parecidas às obtidas no referido teste. As diferenças absolutas entre estas duas simulações são apresentadas na Figura 92 e são da ordem de 10^{-2} a 10^{-3} m/s . Apesar de serem pequenas em magnitude, nas regiões adjacentes ao lançamento (áreas laterais indicadas na figura por retângulos vermelhos) indicam diferenças geradas pelo fato de que no caso não permanente as velocidades variam e podem gerar resultados descontínuos dependendo da posição do ponto de retirada dos dados ambientais e do intervalo de acoplamento.

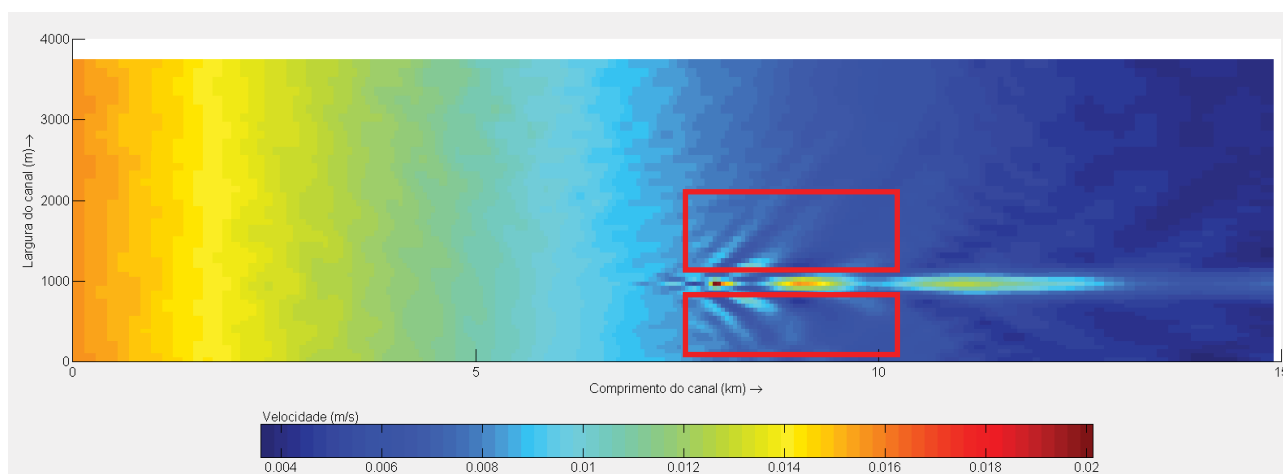


Figura 92 - Diferença absoluta entre as velocidades promediadas na vertical obtidas com o acoplamento dinâmico para o caso teste 1 do regime permanente e com o acoplamento dinâmico para o caso em regime não permanente 12 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, ambas geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Retângulos em vermelho indicam descontinuidades na velocidade geradas no caso em regime não permanente.

Para o instante de 15 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, as velocidades ambiente estão em torno de $0,5 \text{ m/s}$ entre uma crista e uma cava, reduzindo a velocidade. Verifica-se na Figura 93 descontinuidades nas velocidades tanto a montante como a jusante do lançamento, causadas pelos motivos apresentados anteriormente.

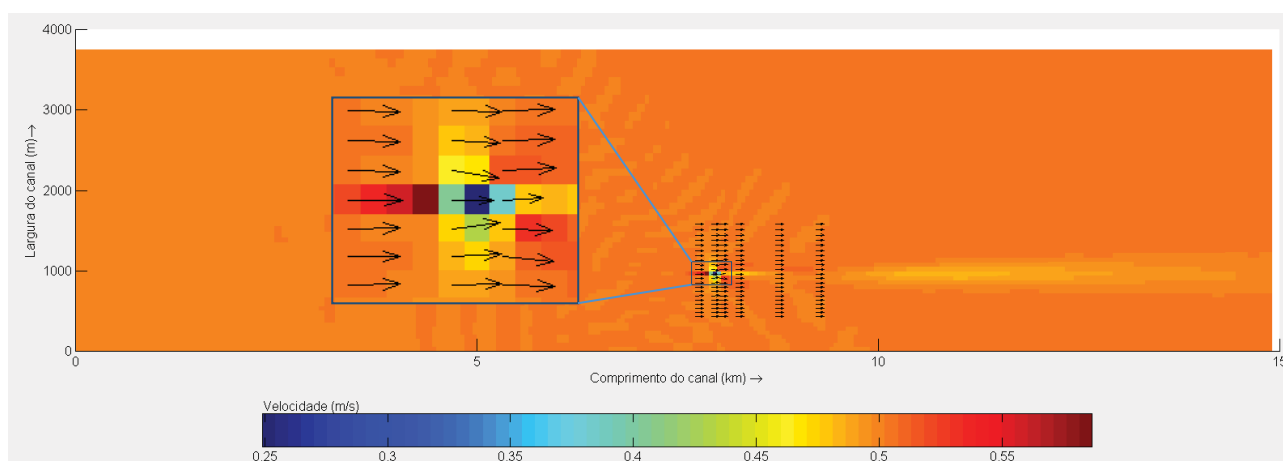


Figura 93 - Velocidades promediadas na vertical 15 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ com acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140$ e 150 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.

Neste caso, obtém-se um número de Froude do ambiente em torno de 13, que segundo Tian; Roberts; Daviero (2004) geram uma pluma que ocupa toda a coluna d'água e com a mesma anexada ao fundo do canal, como se pode observar na Figura 94. A pluma atinge a superfície ao final do campo próximo.

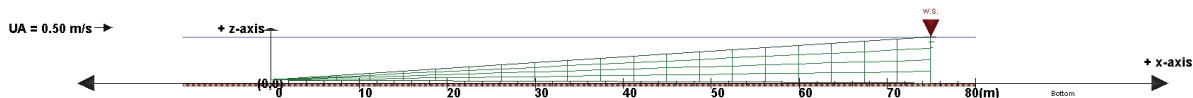


Figura 94 – Visualização do comportamento da pluma, do ponto de lançamento ao final do campo próximo, gerada pelo CORMIX. Escala $y:x = 0,37$ e $z:x = 0,35$.

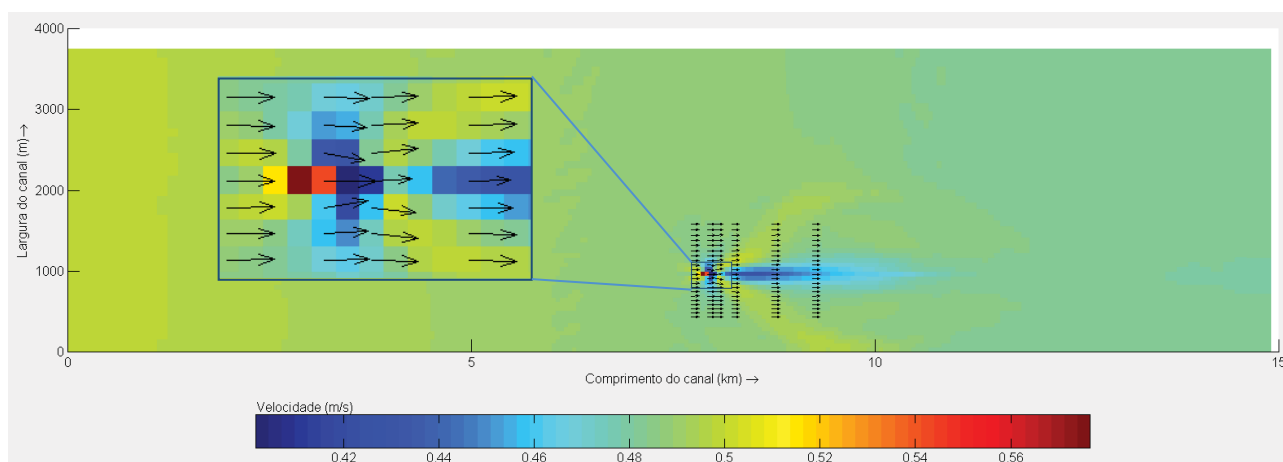
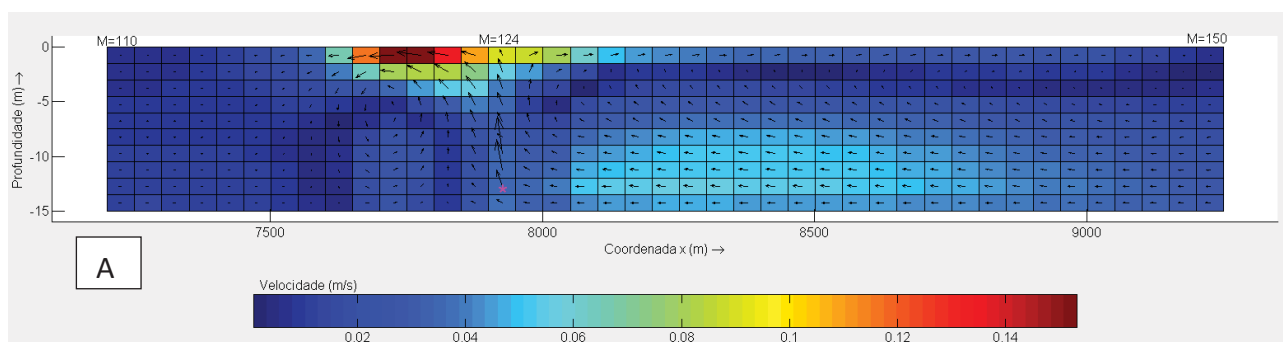


Figura 95 - Velocidades promediadas na vertical 21 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ com acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=120, 124, 126, 130, 140$ e 150 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.

O instante de 21 horas após o início da execução do modelo dinâmico possui velocidade ambiente de $0,487 \text{ m/s}$ e localiza-se num ponto oposto ao instante de 15 horas. Ou seja, em 21 horas o instante está localizado entre uma cava e uma crista, com aumento da velocidade ambiente. Ambos instantes apresentam velocidades ambientes similares e recebem o mesmo lançamento, $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Entretanto, nota-se que os resultados obtidos para os dois instantes são bem distintos. Isto porque as situações que antecederam estes instantes eram bem distintos, um com uma velocidade menor que $0,5 \text{ m/s}$ (21 h) e outro com velocidade maior (15 h).

A seguir se apresenta a hidrodinâmica referente ao instante de 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico.



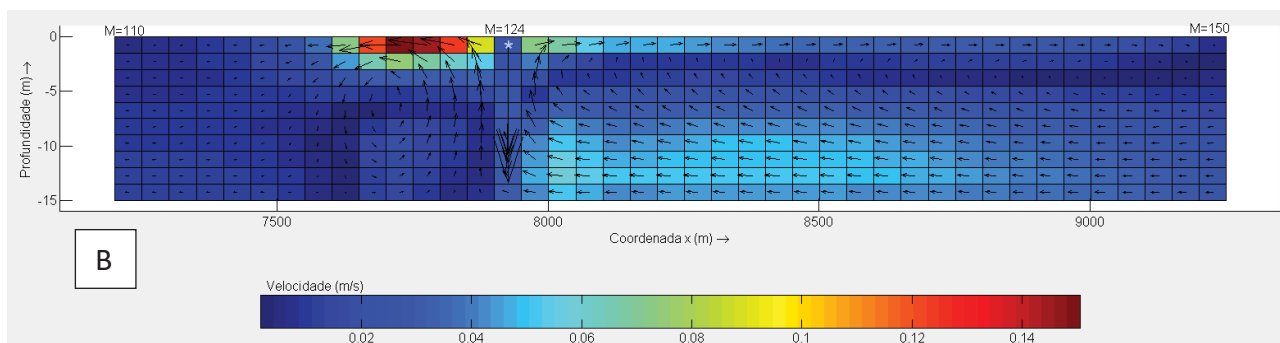


Figura 96 - Velocidades da seção longitudinal que contém (A) o ponto de lançamento (*) (N=19) e (B) o ponto de retorno de água retirada pelo arraste (*) (N=21) geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando o acoplamento dinâmico para instante de 18 h após o início da execução do modelo, desde 700 m a montante do lançamento (M=110) até 1300 m a jusante (M=150). Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xz. Escala horizontal: $1 \text{ m/s} = 500 \text{ m}$ e escala vertical: 20 vezes maior.

Analisando-se o perfil longitudinal de velocidades para o instante de 18 horas verifica-se que, diferentemente dos outros instantes em que o campo próximo finalizava 100 m a jusante do lançamento, o campo próximo finalizou 100 m a esquerda do lançamento, conforme se nota na Figura 96A o ponto de lançamento em M=124 e N=19, e na Figura 96B o ponto de retorno da água do arraste em M=124 e N=21. Nestas figuras também se observa que as camadas de fundo, meio e de superfície são distintas, isto porque a velocidade ambiente neste instante é próxima a zero, fazendo com o lançamento seja dominante.

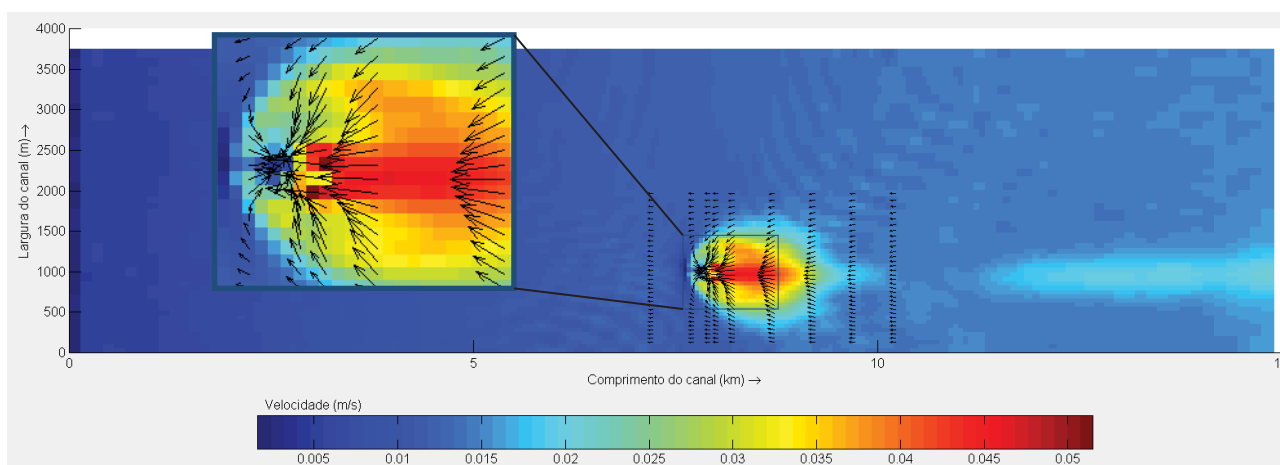


Figura 97 – Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de fundo do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando o acoplamento dinâmico. cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160 e 170. Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 5000 \text{ m}$. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.

Na camada de fundo, com exceção da seção transversal, M=120, localizada a 200 m a montante do lançamento, todos os vetores estão posicionados de jusante para montante

(Figura 97). Isto ocorre pois devido ao lançamento em um ambiente quase estagnado, há uma zona de circulação vertical a montante do lançamento e no fundo do canal os vetores estão indo em sentido contrário, como pode se observar na Figura 96.

Observa-se na hidrodinâmica da camada de fundo que há uma descontinuidade nas alterações induzidas pela pluma, o que pode ter sido provocado pelos diferentes valores de velocidade ambiente atrelado a escolha do ponto de retirada dos dados ambientais e do intervalo de acoplamento.

Assim como nos demais testes, a montante do lançamento há um aumento da velocidade e após o mesmo uma redução. Estas alterações, neste instante, estão na ordem de 10^{-2} m/s. Em uma inversão de fluxo do escoamento ambiente, esperava-se que a pluma se deslocasse na direção do mesmo, porém isto não foi observado pois as velocidades do ambiente são muito baixas e ficam pouco tempo no sentido jusante-montante.

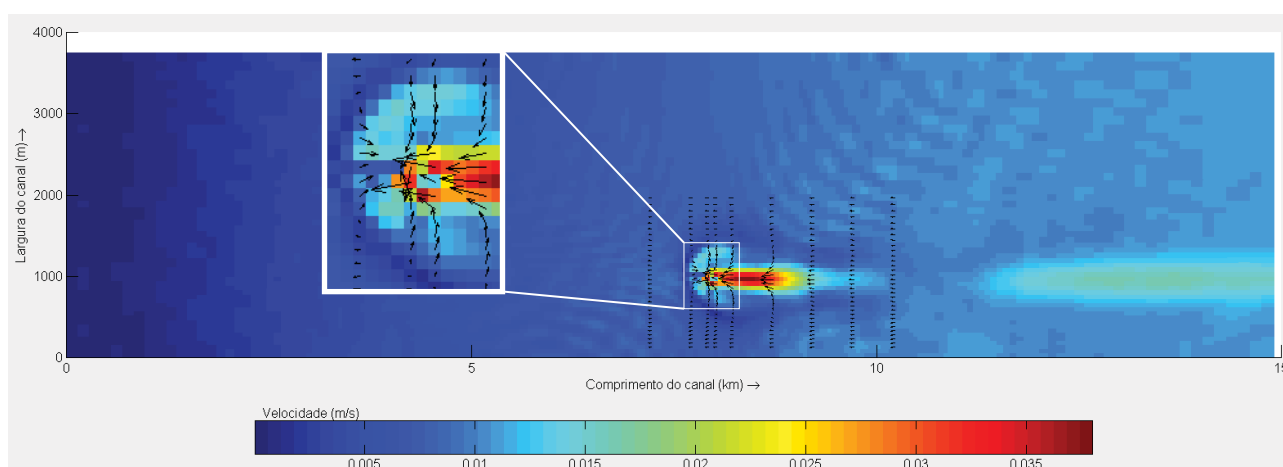


Figura 98 – Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada do meio do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 5000 \text{ m}$. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.

Na Figura 98 apresenta-se a hidrodinâmica do ambiente para a camada do meio do canal, onde percebe-se que a descontinuidade nas alterações induzidas pela pluma está mais visível do que na camada de fundo, porém os valores envolvidos nesta descontinuidade diferem em 10^{-2} m/s.

O comportamento na camada do meio assemelha-se a camada de fundo, mas com valores reduzidos. Ou seja, há redução da velocidade a jusante e aumento a montante do lançamento, com a seção transversal a 200 m a jusante do lançamento ($M=120$) com fluxo

invertido devido às zonas de recirculação na vertical. Lembrando que neste instante os vetores se deslocam da direita para a esquerda.

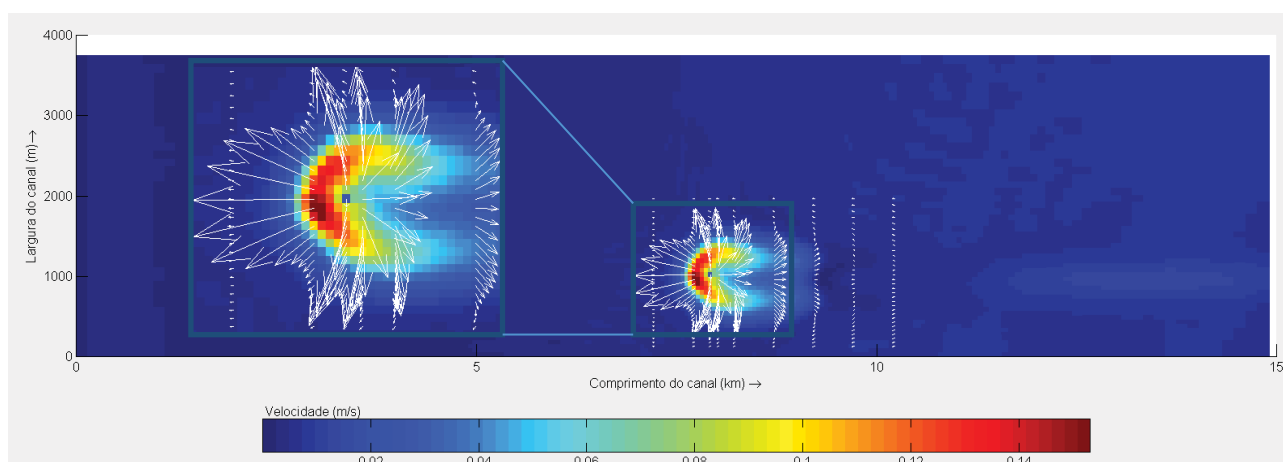


Figura 99 - Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M=110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 5000 \text{ m}$. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.

A camada de superfície do canal no acoplamento dinâmico é a que apresenta mais alterações hidrodinâmicas devido ao método DESA aplicada neste tipo de acoplamento. Para o instante de 18 horas, a velocidade da base de comparação para esta camada varia entre $0,001$ a $0,006 \text{ m/s}$, o que significa alterações de 10^{-1} a 10^{-2} m/s (Figura 99). A análise de diferenças absolutas de velocidade entre este instante e a base de comparação correspondente demonstram não haver diferenças. Ou seja, o escoamento ambiente gerado pelas diferenças é praticamente igual ao escoamento obtido pelo acoplamento dinâmico, como se pode observar na Figura 100.

Este resultado corrobora com Bleninger (2006) que afirma que em ambientes pouco dinâmicos sofrem mais alterações devido ao lançamento de efluentes via emissários.

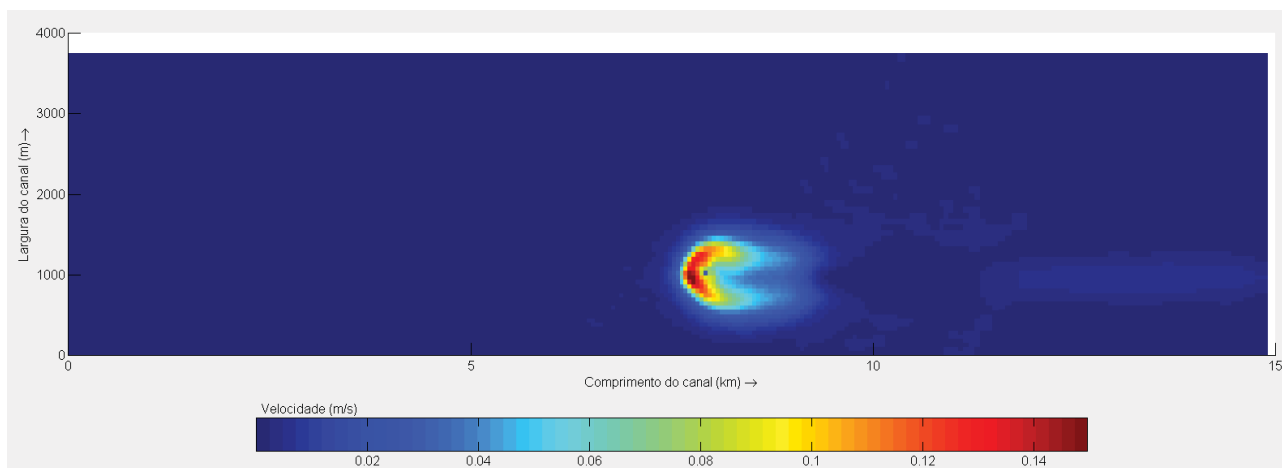


Figura 100 - Diferença absoluta entre as velocidades base de comparação e as obtidas com o acoplamento dinâmico para 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, para um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.4.3.2 Alta vazão de efluentes

A outra análise realizada para o escoamento em regime não permanente foi o lançamento de uma alta vazão de efluentes, $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Nesta situação, todos os instantes analisados, 12, 15, 18 e 21 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, apresentaram perfis verticais distintos. Entretanto, o instante de 18 horas será apresentado separadamente pois neste instante o início e o final do campo próximo ocorrem em seções longitudinais diferentes. Desta forma, os resultados são apresentados na camada de fundo, do meio e de superfície do canal para todos os instantes.

Devido ao lançamento de uma alta vazão nota-se que a extensão das alterações é maior do que quando o ambiente recebe a vazão mais baixa e que as velocidades referentes aos instantes de 15 e 21 horas são similares, porém com dinâmicas diferentes no ambiente. Verifica-se também que independente da vazão, no instante de 15 horas, o final do campo próximo ocorreu na seção transversal $M=125$, enquanto que para os instantes de 12 e 21 horas o campo próximo finalizou em $M=126$.

O comportamento da hidrodinâmica no instante 18 horas também se assemelhou no fato de que o final do campo próximo teve deslocamento lateral e não longitudinal, como nos demais instantes e tal comportamento foi independente da vazão.

A seguir apresentam-se os resultados para o instante de 12 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico para as camadas no fundo, meio e superfície.

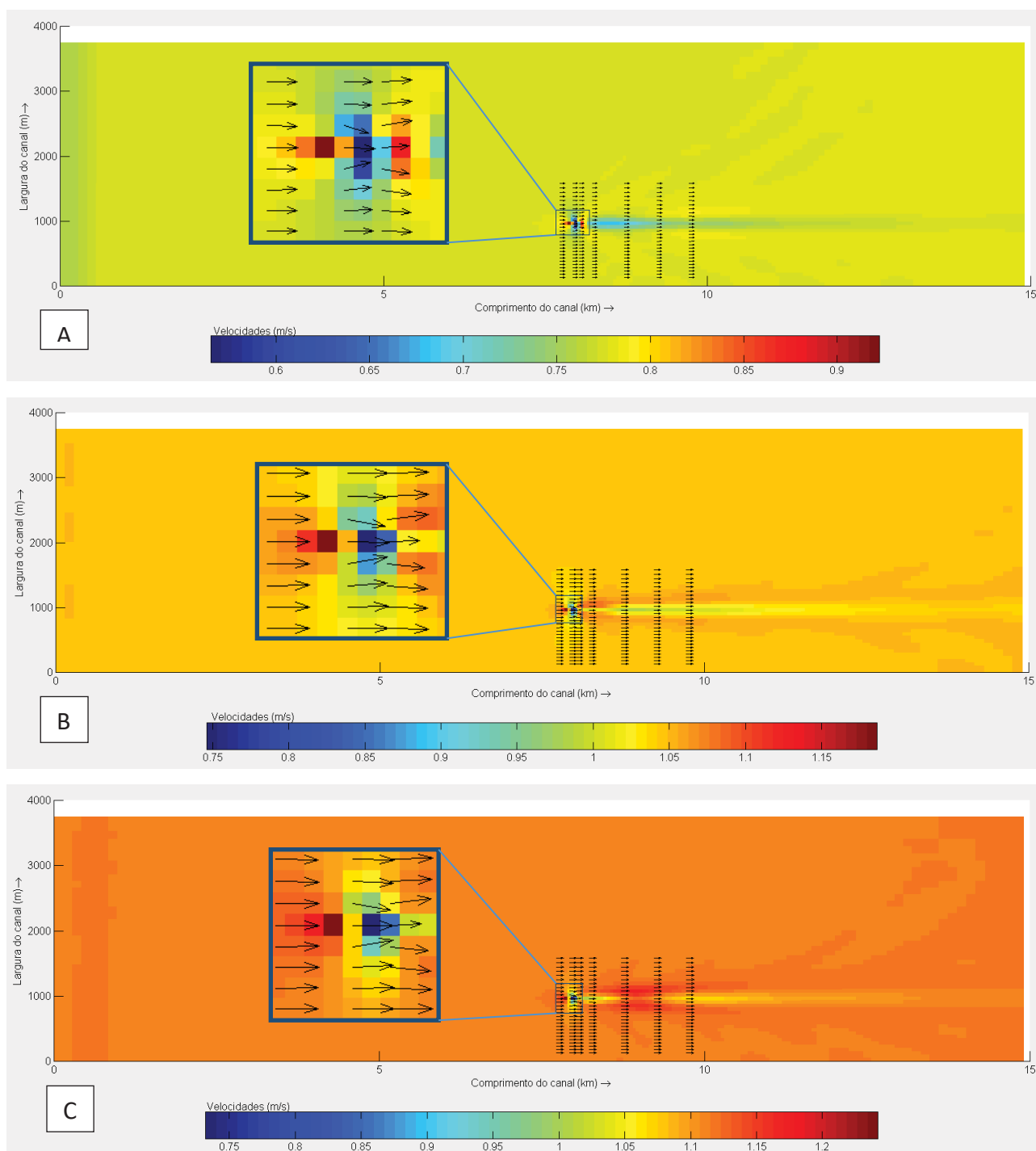


Figura 101 - Velocidades 12 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de (A) fundo, (b) meio e (C) superfície do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.

Analisando-se a Figura 101 tem-se a sensação de que estes resultados não correspondem a um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ pois as alterações são pequenas, similares as ocorridas no caso teste 1 do escoamento em regime permanente. Entretanto, esta situação ocorre

devido as altas velocidades (maiores que 1,0 m/s) observadas em instantes que precedem este momento, e que impedem que haja um espalhamento lateral da pluma. Para este instante o número de Froude do ambiente é igual a 10,08, o que confirma o comportamento observado.

Neste passo temporal, as alterações mais intensas estão localizadas próximas ao lançamento sendo que há um aumento das velocidades nas seções que antecedem o lançamento e uma diminuição nas seções imediatamente posteriores (Figura 102).

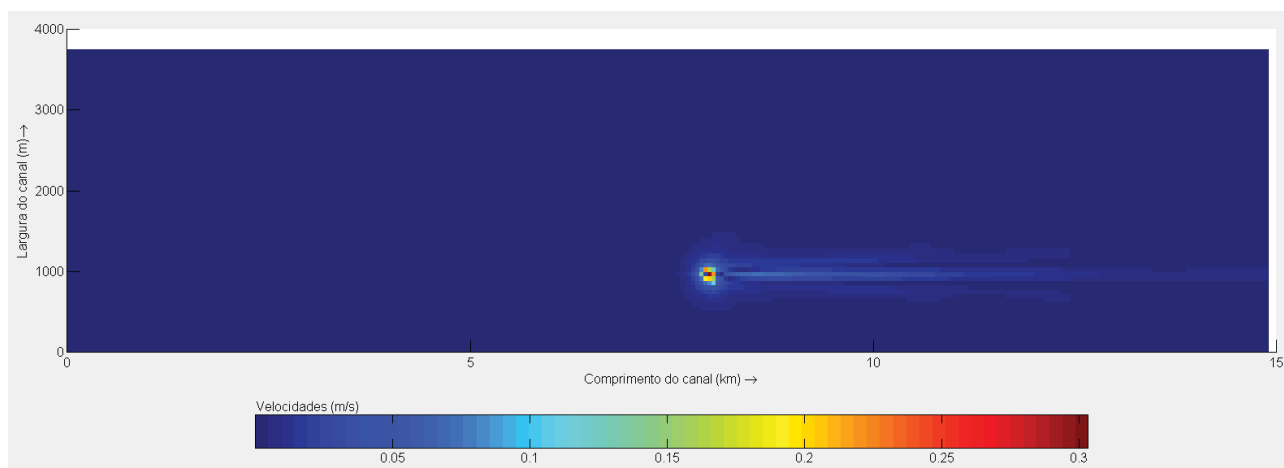
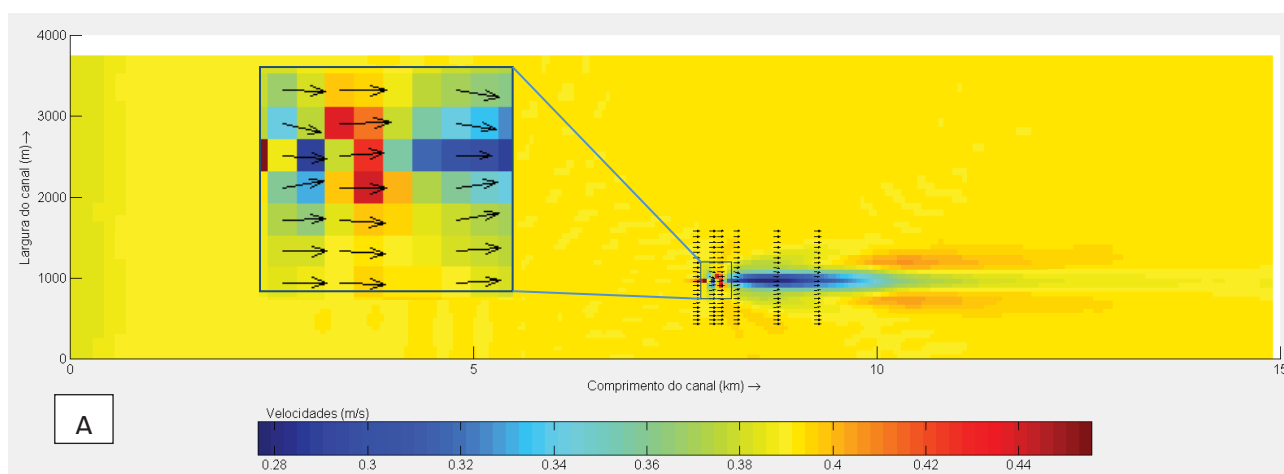


Figura 102 - Diferença absoluta entre as velocidades da base de comparação e as obtidas com o acoplamento dinâmico promediadas na vertical para 12 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, para um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

A seguir demonstram-se os resultados referentes ao instante 15 horas nas camadas de fundo, meio e superfície.



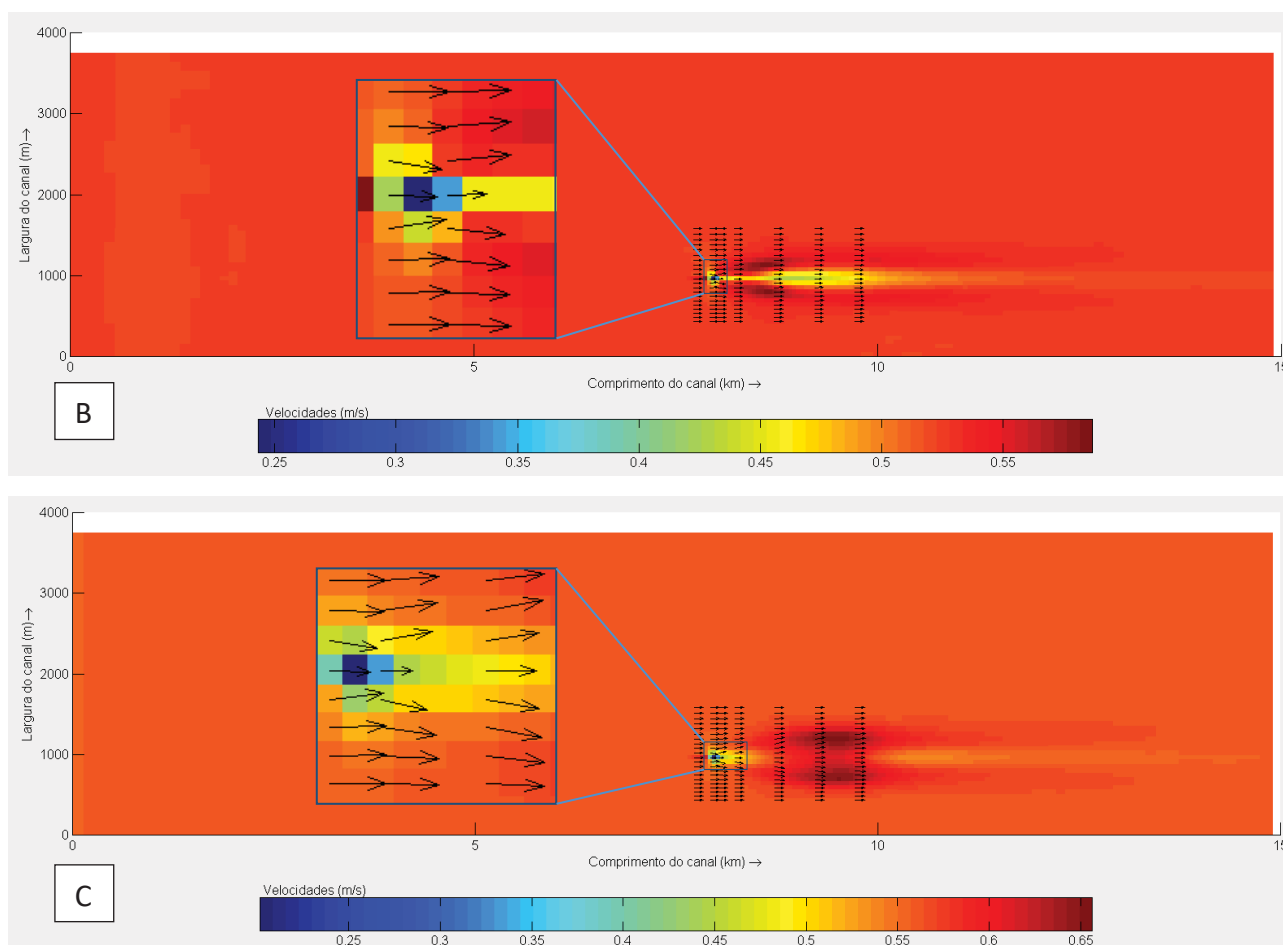


Figura 103 - Velocidades 15 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de (A) fundo, (b) meio e (C) superfície do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150$ e 160 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 200 \text{ m}$. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.

Após 15 horas do início da execução do modelo hidrodinâmico, a circulação ambiente está em um instante que está com velocidades médias entre o máximo e o mínimo, uma vez que está dentro do ciclo de variação do nível d'água entre uma crista e uma cava. Neste instante, com a diminuição da velocidade ambiente, a pluma consegue induzir alterações na velocidade em uma área maior do que a instante de 12 horas (Figura 103).

Nas camadas de fundo e do meio há um comportamento semelhante ao do instante de 12 horas, mas as reduções na camada de fundo se estendem por distâncias maiores e na camada do meio há redução no eixo do ponto de lançamento com aumento de velocidade nas laterais. No passo temporal de 12 horas, estes efeitos são mais suaves. Na camada de superfície ocorre o inverso, diminuição a montante e aumento a jusante do lançamento, onde este aumento se desloca também para as laterais (Figura 103). Estes efeitos resultam

da interação entre a circulação ambiente e o lançamento de efluentes, confirmando o comportamento esperado de um escoamento com número de Froude do ambiente igual 1,28.

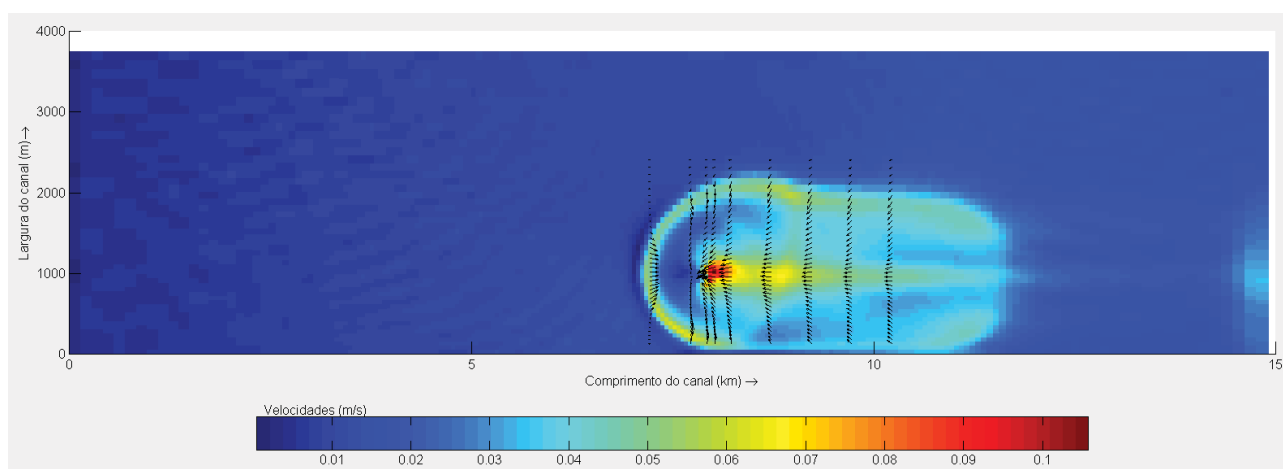


Figura 104 - Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de fundo do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 2000 \text{ m}$.

Para o instante de 18 horas, que apresenta as menores velocidades ambiente, configurando quase um ambiente estagnado, as velocidades induzidas alteram uma grande região do escoamento. Na camada de fundo, Figura 104, as alterações apresentam uma maior uniformidade dentro da região com velocidades modificadas, mas com mudanças mais destacadas no eixo do lançamento e no contorno da pluma com o escoamento ambiente. Estas surgem dos processos de espalhamento lateral do campo intermediário.

Nesta camada assim como na camada do meio, os vetores velocidade na seção transversal $M=110$, a 700 m a montante do lançamento, estão em sentido contrário ao fluxo ambiente neste instante devido a uma zona de recirculação que se apresenta antes do lançamento.

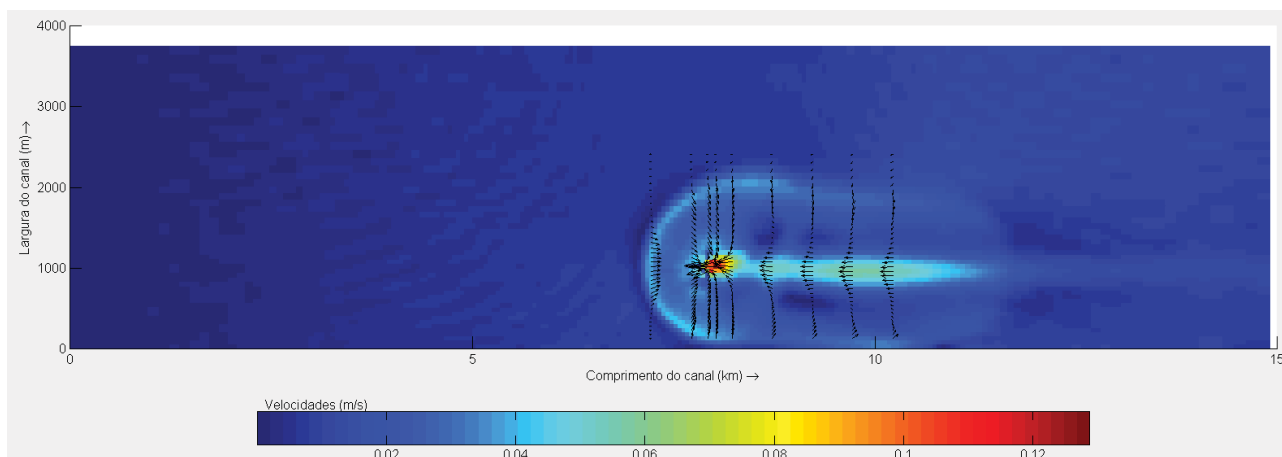


Figura 105 - Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada do meio do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 3000 \text{ m}$.

Na camada do meio, as alterações induzidas pelo lançamento são mais proeminentes no eixo do lançamento, mas nota-se alterações mais suaves nos contornos entre a pluma e o escoamento (Figura 105).

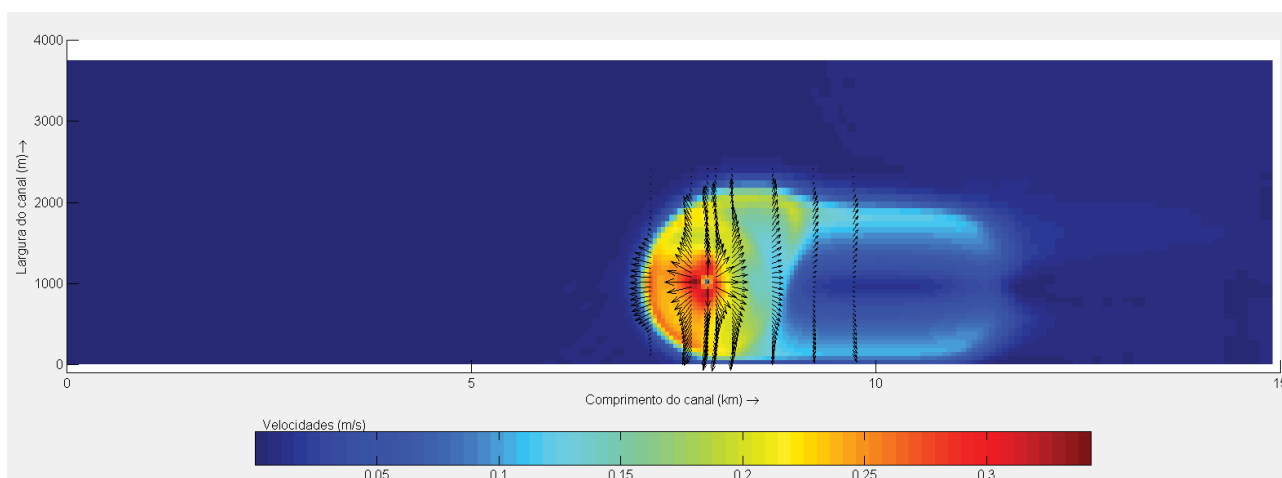


Figura 106 - Velocidades 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de superfície do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 110, 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 2000 \text{ m}$.

As alterações, na camada de superfície, são mais intensas na região ao redor do lançamento e modificam o sentido do escoamento a jusante do mesmo, diferenciando das demais camadas (Figura 106). Neste caso, a pluma é dominada pela flutuabilidade de acordo com o valor do número de Froude do ambiente obtido para este instante temporal, $2,21 \cdot 10^{-6} \ll 1$ (TIAN; ROBERTS; DAVIERO, 2004).

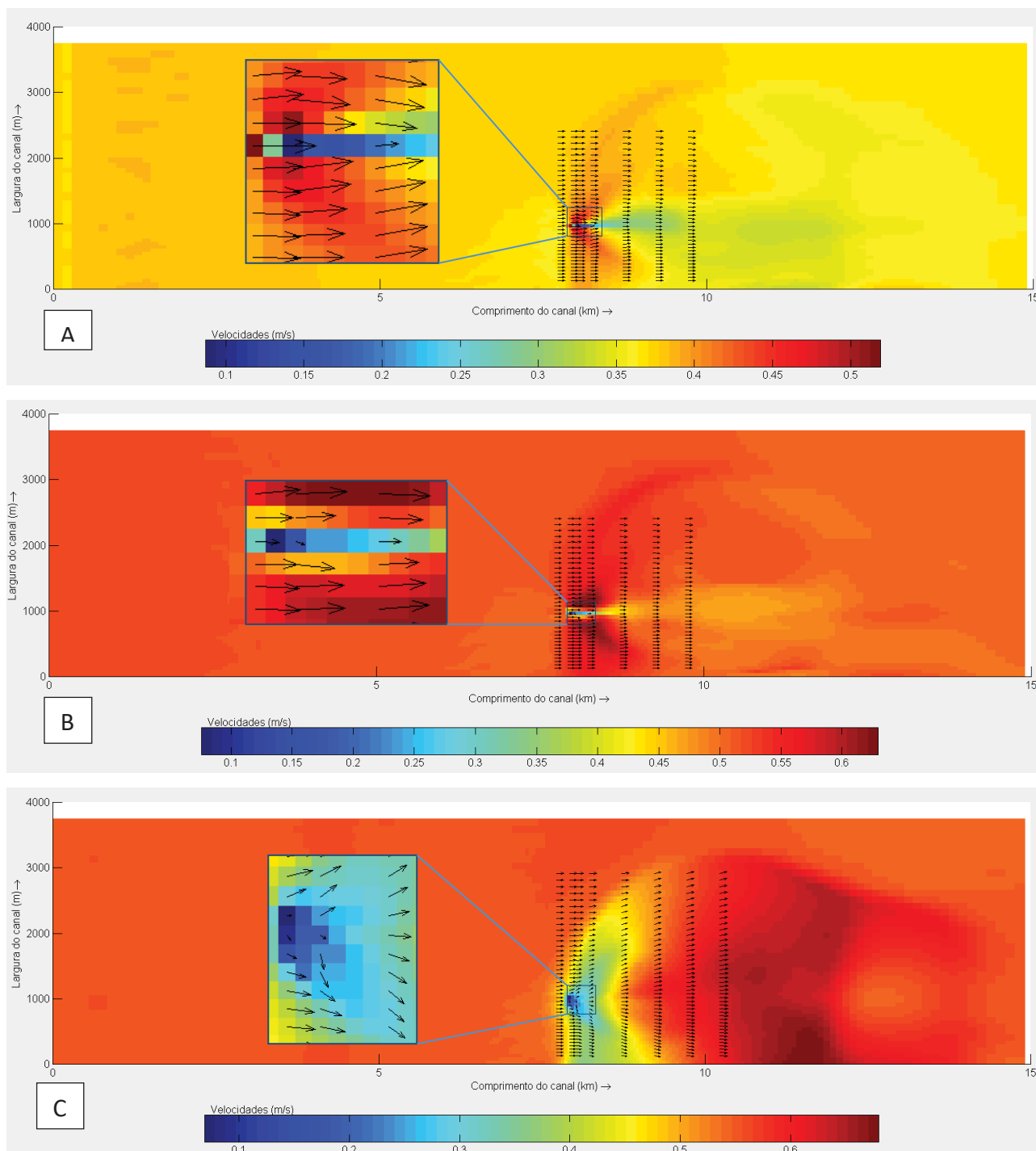


Figura 107 - Velocidades 21 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico na camada de (A) fundo, (b) meio e (C) superfície do canal geradas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando o acoplamento dinâmico. Cores de fundo indicam a magnitude da velocidade tridimensional e as setas indicam os vetores velocidade projetados no plano xy nas seções transversais em $M= 120, 124, 126, 130, 140, 150, 160$ e 170 . Escala dos vetores: $1 \text{ m/s} = 200 \text{ m}$. No zoom detalhes da alteração na hidrodinâmica devido ao lançamento.

21 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, o nível d'água encontra-se entre a cava e a crista da onda fazendo com que a velocidade do escoamento, apesar de ter valor similar ao instante de 15 horas, tenha um comportamento distinto deste. Isto é

causado pelo efeito de continuidade do escoamento, ou seja, o instante de 15 horas é precedido por instantes com altas velocidades e o instante de 21 horas por momentos de baixa velocidade.

Nas camadas de fundo e do meio, o comportamento assemelha-se aos demais instantes, destacando-se as alterações nas velocidades no eixo do lançamento e no contorno entre a pluma e o corpo receptor, enquanto na camada superior observa-se que mesmo apresentando uma área de dimensões maiores do que no instante de 18 horas, os vetores não invertem o sentido. Isto é, a velocidade horizontal gerada pelo retorno da água retirada pelo arraste não se sobrepõe a velocidade do ambiente.

Com o valor do número de Froude do ambiente de 1,21 esperava-se que não houvesse um espalhamento horizontal lateral tão intenso de acordo com os resultados apresentados na literatura (TIAN; ROBERTS; DAVIERO, 2004), porém nestes casos o lançamento era efetuado em escoamentos permanentes.

4.4.4 Análise de sensibilidade

Para os casos em regime não permanente a análise de sensibilidade foi realizada em termos da escolha do ponto de monitoramento (ponto de retirada das características hidrodinâmicas ambientais) e do passo de tempo do acoplamento.

Na análise de sensibilidade realizada para os casos em regime permanente verificou-se a importância do ponto de monitoramento não estar localizado em uma região de influência direta dos lançamentos, que nestes casos foi resolvida colocando-se o ponto a montante do lançamento. Porém, nos casos em regime não permanente há inversão do fluxo e por isso foram necessários mais testes para a definição deste ponto.

A inversão de fluxo permanece durante pouco tempo, porém quando ocorre a velocidade ambiente está baixa e permite que a pluma de efluentes atinja uma área maior, podendo desta forma atingir o ponto de retirada dos dados ambientais e fazer com os resultados fiquem fisicamente incoerentes.

Para os testes com baixa vazão, $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$, lançados do ponto M=124 e N=20 foram efetuadas 3 execuções com diferentes pontos de retirada: (a) M=120, N=20 (200 m de distância no eixo), (b) M=120, N = 24 (283 m oblíquo), e (c) M=114, N=20 (500 m no eixo).

Analizando os arquivos de entrada do CORMIX gerados pelo acoplamento, com o ponto (a) o escoamento ficou em torno de 7% do tempo executado com a coluna d'água

pouco estratificada, enquanto que com os outros pontos a coluna d'água ficou uniforme durante todo o tempo de execução do acoplamento dinâmico, como era de se esperar, uma vez que a vazão de efluentes é baixa.

Para os testes com alta vazão, $40 \text{ m}^3/\text{s}$, lançados do ponto M=124 e N=20 também foram efetuadas 3 execuções com diferentes pontos de retirada: (a) M=114, N=20 (500 m de distância no eixo), (b) M=100, N = 20 (1200 m no eixo), e (c) M=120, N=30 (538 m oblíquo). Neste caso, o ponto (a) permaneceu 15% do tempo estratificado, o ponto (b) 3% e o ponto (c) 31%. Este aumento na porcentagem de tempo em que ficou estratificado, deve-se ao fato do escoamento ambiente receber uma alta vazão de efluentes associado com instantes de velocidades tendendo a zero.

Com relação ao passo de tempo utilizado para o acoplamento, foram executados testes com 15, 45 e 90 minutos tanto para o lançamento de baixa como para o de alta vazão, e 180 minutos somente para baixa vazão. Os diferentes intervalos de tempo resultaram em alterações na ordem de 10^{-2} m/s para todos os intervalos testados, porém houve variação na dimensão da área com diferenças. Para o intervalo de 15 minutos foi na região do campo próximo e em uma área maior para 45, 90 e 180 minutos, como se observa na Figura 108 e Figura 109.

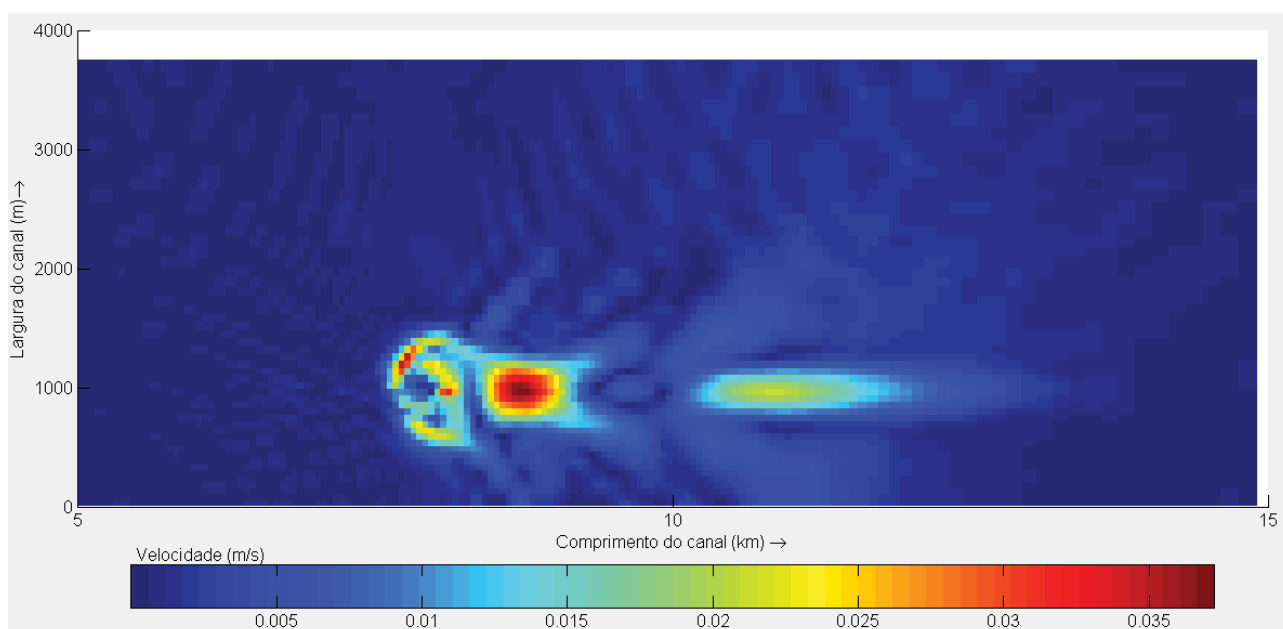


Figura 108 - Diferença entre o campo de velocidades, 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, utilizando um passo de tempo do acoplamento de 30 minutos e 90 minutos para um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento dinâmico.

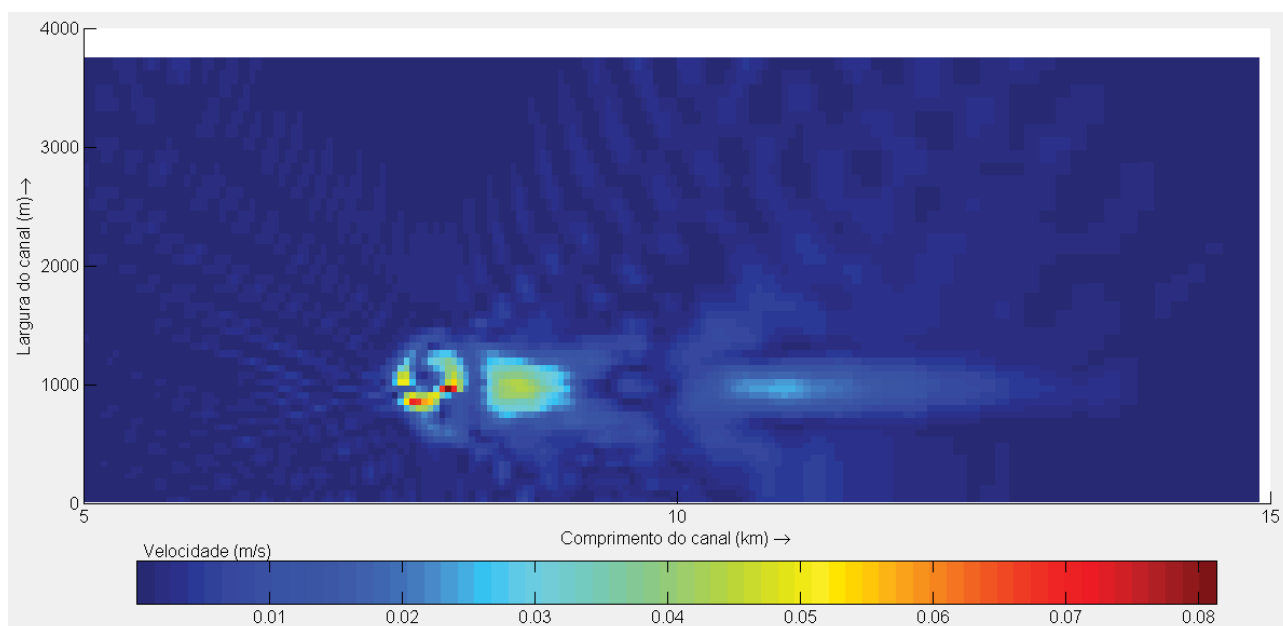


Figura 109 - Diferença entre o campo de velocidades, 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, utilizando um passo de tempo do acoplamento de 30 minutos e 180 minutos para um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento dinâmico no instante.

Para o lançamento a uma alta vazão, $40 \text{ m}^3/\text{s}$, todos os intervalos apresentaram a área afetada pelas diferenças ao redor do campo próximo, sendo na ordem de 10^{-2} m/s para os intervalos de 15 e 90 minutos, enquanto que para 45 minutos as diferenças foram na ordem de 10^{-1} a 10^{-2} m/s , como se observa na Figura 110.

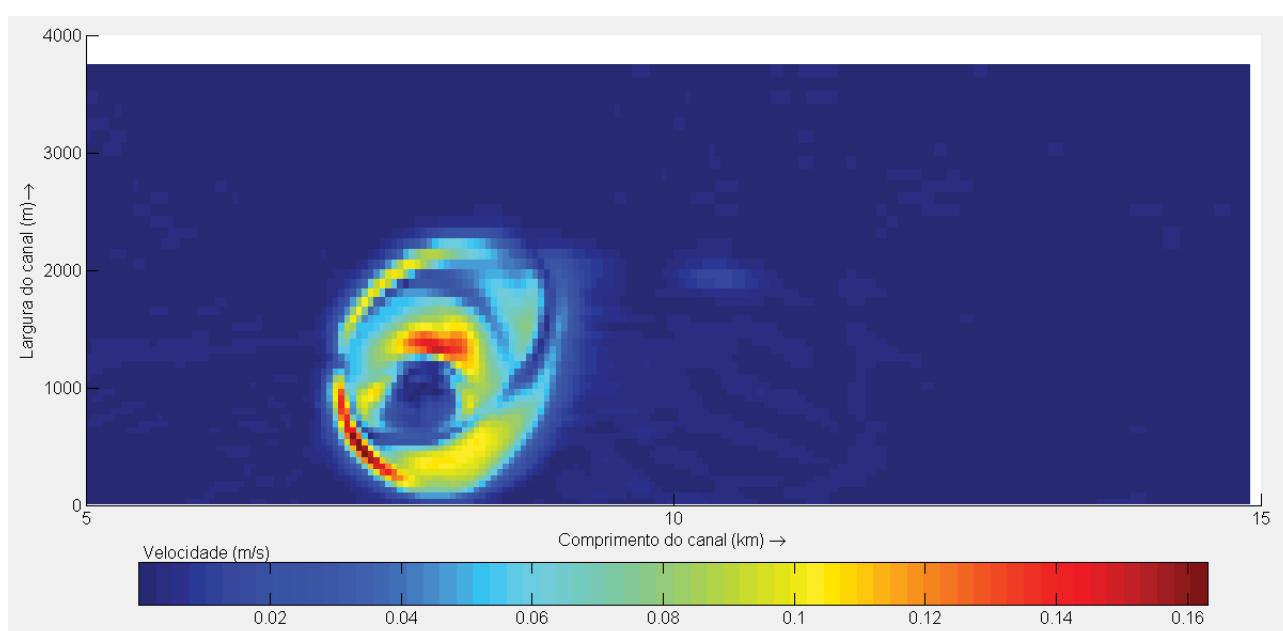


Figura 110 - Diferença entre o campo de velocidades, 18 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico, utilizando um passo de tempo do acoplamento de 30 minutos e 45 minutos para um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ na camada de superfície do canal obtido pelo acoplamento dinâmico no instante.

4.5 RESUMO DOS RESULTADOS DOS CASOS NÃO PERMANENTES

Apresenta-se um resumo dos resultados obtidos a partir da aplicação dos acoplamentos passivo e dinâmico para o lançamento de efluentes a uma baixa e alta vazão em um ambiente não permanente. São apresentadas as mesmas características analisadas para os casos permanentes: porcentagem da área com velocidade induzida e a máxima velocidade induzida (Tabela 8).

Tabela 8 – Porcentagem da área com velocidade induzida e máxima velocidade induzida obtida com as diferentes formas de acoplamento nos instantes 12, 15, 18 e 21 horas após o início da execução do modelo hidrodinâmico para lançamentos de baixa e alta vazão.

	Instante	Acoplamento passivo				Acoplamento dinâmico			
		Máx. vel. Ind. (m/s)	Área com vel. Ind. (%)			Máx. vel. Ind. (m/s)	Área com vel. Ind. (%)		
			1%	5%	10%		1%	5%	10%
Baixa vazão	12 h	0,003	0	0	0	0,39	53,64	0,62	0,13
	15 h	0,005	0	0	0	0,26	4,26	0,09	0,03
	18 h	0,009	35,56	6,18	2,65	0,03	97,32	88,25	74,83
	21 h	0,016	1,56	0	0	0,09	3,85	0,47	0,09
Alta vazão	12 h	0,04	0,69	0	0	0,31	56,84	0,29	0,04
	15 h	0,07	3,53	0,34	0,1	0,28	5,96	0,80	0,2
	18 h	0,04	59,30	40,71	30,72	0,09	96,08	81,73	66,88
	21 h	0,06	24,91	1,58	0,1	0,40	30,30	0,88	0,24

A partir da Tabela 8 é possível verificar que porcentagens das áreas com velocidade induzida são, de maneira geral, todas maiores do que as dos casos em regime permanente, mesmo a referente ao instante de 12 horas, cujas características se assemelham bastante ao caso teste 1. Nota-se também que as menores áreas com velocidade induzida são observadas com o acoplamento passivo.

O fato de se tratar de um escoamento em regime não permanente, faz com que as alterações observadas em um instante não estejam relacionadas somente àquele instante, e sim é resultado das alterações dos instantes que antecederam o passo temporal analisado.

As máximas velocidades apresentadas na Tabela 8 estão localizadas em áreas restritas e em todos os casos estudados representam uma área bem menor do que as apresentadas na tabela anterior.

Comparando-se os valores das velocidades máximas induzidas, nota-se que de maneira geral estas velocidades, para o acoplamento passivo, estão diretamente relacionadas a vazão do efluente. Isto é, a relação entre a máxima velocidade induzida por um lançamento de 3,9 m³/s com a induzida por um lançamento de 40 m³/s, é de uma ordem de grandeza

menor, com exceção para os resultados do acoplamento dinâmico que apresentou, em quase sua totalidade, valores na mesma ordem de grandeza para os lançamentos de baixa e alta vazão.

4.6 ANÁLISE E DEFINIÇÃO DE ESCALAS CARACTERÍSTICAS

Um dos objetivos específicos deste trabalho é a definição de critérios que indiquem o tipo de acoplamento mais apropriado baseado na análise de escalas características. Como não há dados experimentais ou medidos para avaliar qual acoplamento produz o melhor resultado diante de cada caso teste, esta avaliação foi realizada com base no comportamento hidrodinâmico esperado: análise dos processos intervenientes nos acoplamentos e literatura. Desta forma, foram aplicados os critérios propostos por Bleninger (2006) no item 3.3.3 e os seus resultados confrontados com o comportamento hidrodinâmico da pluma, com as áreas de velocidade induzida e com outras escalas características dos processos atuantes dentro dos acoplamentos nos diferentes casos testes para os casos em regime permanente, visando a definição de critérios que possibilitem informar qual acoplamento é o mais indicado.

Tabela 9 – Resultados do critério de instabilidade do campo próximo (Critério 1), critério da quantidade de movimento distribuída ao longo da profundidade (Critério 2) e critério de Froude (F_a) dos casos testes.

Característica	Caso teste 1	Caso teste 2	Caso teste 3	Caso teste 4	Caso teste 5	Caso teste 6
l (m)	25,00	25,00	25,00	10,00	10,00	10,00
l_m (m)	0,09	1,47	7,59	1,00	16,00	82,64
l_M (m)	2,03	2,03	2,03	4,68	4,68	4,68
F_a	103,66	1,62	0,14	10,12	0,16	0,01
Critério 1 $> 0,54$	- 5,72	0,15	0,46	4,83	1,47	1,29
Critério 2 > 1	0,01	0,1	0,51	0,07	1,07	5,51

l = espaçamento entre os difusores; l_m = escala de comprimento jato/fluxo transversal ; l_M = escala de comprimento jato pluma.

Na Tabela 9 verifica-se que os casos testes que estão submetidos a uma baixa vazão de efluentes, casos testes de 1 a 3, apresentam estabilidade no campo próximo, enquanto que os casos testes sob influência da alta vazão de efluentes possuem algum tipo de instabilidade. Os casos teste 4, 5 e 6 exibiram instabilidade do campo próximo, e os casos teste 5 e 6 demonstraram que, além de apresentar instabilidade do campo próximo, a quantidade de movimento do lançamento é maior do que a quantidade de movimento do ambiente, ambas distribuídas ao longo da profundidade.

De modo a validar estes resultados, os mesmos foram confrontados com as porcentagens de área com velocidade induzida calculada para cada caso teste e apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Porcentagens da área com velocidade induzida obtida com o acoplamento dinâmico e passivo com velocidades induzidas superiores a 1, 5 e 10% da velocidade média da base de comparação de caso teste.

Caso Teste	Porcentagem da área com velocidade induzida (%)					
	Acoplamento Dinâmico			Acoplamento Passivo		
	1%	5%	10%	1%	5%	10%
1	2,98	0,36	0,13	1,45	0	0
2	19,24	0,74	0,1	20,25	0,94	0
3	37,08	7,87	0,69	31,03	4,99	0,30
4	6,65	1,56	0,34	5,23	0,18	0
5	53,46	4,58	0,85	31,71	5,26	0,81
6	70,41	39,79	12,10	71,08	28,09	3,89

Observa-se que o caso teste 4 gera alterações hidrodinâmicas limitadas a uma pequena área do domínio tanto nos resultados obtidos com o acoplamento dinâmico quanto com o passivo, ao passo que o caso teste 5 e 6 geram grandes alterações, sendo estes os dois casos em que os lançamentos produzem as maiores alterações hidrodinâmicas (ver itens 4.2.6.2 e 4.2.7.2).

Ainda analisando os resultados apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10, nota-se que os valores tanto de área com velocidade induzida como de Froude do ambiente do caso teste 3 são similares ao caso teste 5, porém o caso teste 3 recebe o aporte de uma pequena vazão de efluentes que não chega a causar instabilidades no campo próximo ou ter a quantidade de movimento do lançamento maior do que do ambiente.

Bleninger (2006) propôs que o acoplamento dinâmico deveria ser utilizado se pelo menos o critério 1 ou 2 fosse satisfeito, entretanto o caso teste 4 apesar de apresentar instabilidade no campo próximo apresentou número de Froude do ambiente maior do que 10, classificando este escoamento como sendo do tipo (iii), ou seja, o escoamento é dominado pela advecção e o espalhamento lateral da pluma na superfície é bastante limitada (TIAN; ROBERTS; DAVIERO, 2004), o que reflete o valor determinado da área com velocidade induzida.

Além destas análises, baseado nos resultados das áreas com velocidades induzidas e escalas de comprimento dos casos testes que representam combinações entre a vazão do efluente – escoamento ambiente, foi gerada uma expressão obtida da regressão não linear

destes dados com o objetivo de auxiliar na escolha do acoplamento mais apropriado. Para a geração do gráfico da Figura 111 foram utilizados dados somente das porcentagens da área de velocidade induzida maior que 1% da velocidade média da base de comparação dos casos testes para o acoplamento dinâmico. Também foram gerados gráficos relacionando-se a porcentagem da área com velocidade induzida em função da área com velocidade induzida pela área formada pelo comprimento do difusor e a profundidade:

$$A_{vel.induzida}(\%) = f\left(\frac{A_{vel.induzida}}{L_D \cdot H}\right) \text{ e em função da área com velocidade induzida pela área formada pela distância até o final do campo próximo (NFRX) e a profundidade:}$$

$A_{vel.induzida}(\%) = f\left(\frac{A_{vel.induzida}}{NFRX \cdot H}\right)$, porém estes gráficos geraram expressões similares a apresentada na Figura 111, optando-se assim por apresentar somente um dos gráficos obtidos.

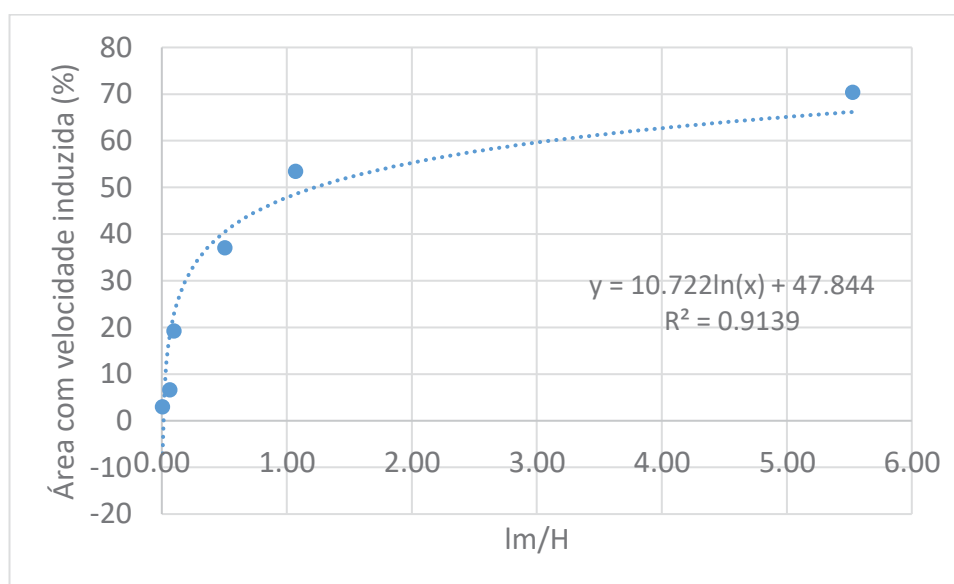


Figura 111 – Gráfico de correlação entre o critério da quantidade de movimento distribuída ao longo da profundidade e a porcentagem da área com velocidade induzida.

Conforme apresentado acima, a partir da expressão obtida na Figura 111 por regressão não linear é possível ter uma estimativa sobre o acoplamento mais apropriado baseado apenas em dados do escoamento ambiente, do lançamento e características do emissário.

Aplicando essa expressão em alguns emissários reais obtém-se os seguintes resultados apresentados na Tabela 11, onde os dados do emissário de Ipanema, Cartagena e Santos foram retirados respectivamente de Feitosa, *et al.* (2013), Bleninger (2006), Ortiz; Arasaki; Marcellino (2006) e Ishikawa (2016).

Tabela 11 – Aplicação da expressão do critério de estabelecimento do acoplamento apropriado a emissários reais.

	Emissários			
	Ipanema (RJ)	Cartagena (Colômbia)	Santos (SP)	Florianópolis (SC)
H (m)	27	20	10	24,28
Q_0 (m ³ /s)	6,0	3,9	7,27	2,452
u_a (m/s)	0,25	0,3	0,4	0,193
L_D (m)	449	540	200	300
u_0 (m/s)	2,94	2,29	2,57	4,63
d_0 (m)	0,17	0,20	0,30	0,15
m_0 (m ³ /s ²)	0,039	0,017	0,093	0,038
j_0 (m ³ /s ³)	0,003	0,002	0,009	0,002
l_m (m)	0,628	0,184	0,584	1,015
l_m / H	0,023	0,009	0,0584	0,0418
Área com vel. Induzida (%)	7,52	- 2,42	17,39	13,81
F_a	4,73	15,14	7,13	3,28
Acoplamento	Passivo	Passivo	Passivo	Passivo

Observa-se da Tabela 11 que a expressão da Figura 111 não é válida para qualquer situação, visto ter gerado um valor de porcentagem de área com velocidade induzida negativa. Para gerar uma expressão com maior aplicabilidade esta deveria estar baseada em uma quantidade mais abrangente de casos testes.

Estes resultados foram gerados a partir da definição de valores médios que representem valores característicos do ambiente (regime permanente), porém estes emissários localizam-se em áreas costeiras e assim estão sob a influência da maré. Desta forma, em situações próximas as estofas de maré as velocidades do escoamento ambiente se aproximam de zero gerando áreas com velocidade induzida significativas, sendo necessário uma análise cautelosa nestes casos em regime não permanente.

4.7 ANÁLISE DA DISPERSÃO

De acordo com a metodologia apresentada no item 3.3.4 as distribuições de concentrações de um traçador conservativo promediadas na vertical foram obtidas a partir da simulação com os acoplamentos passivo e dinâmico com a abordagem Euleriana e Lagrangeana.

Além das distribuições das concentrações são apresentadas as porcentagens das áreas referentes a concentrações superiores a 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima de caso teste.

4.7.1 Abordagem Euleriana

As distribuições de concentrações promediadas na vertical são apresentadas para cada caso teste em termos de isolinhas que representam as concentrações de 25, 37, 50 e 75% da concentração promediada na vertical máxima (C_{max}) em cada simulação efetuada, primeiramente para as concentrações obtidas com o acoplamento passivo para depois serem apresentadas as obtidas com o acoplamento dinâmico.

Cabe salientar que no acoplamento passivo a inclusão dos efluentes é realizada por meio da imposição de fontes ao final do campo próximo representando a área da seção transversal ocupada pela pluma de efluentes neste local, enquanto que no acoplamento dinâmico os efluentes são inseridos no domínio através do algoritmo do acoplamento dinâmico, que calcula e insere junto com a concentração, a vazão de diluição, também na área ocupada pela pluma ao final do campo próximo. No acoplamento passivo apesar da fonte não ser diluída as concentrações promediadas na vertical máximas são menores do que as obtidas com o acoplamento dinâmico, como pode se observar na Tabela 12. Isto ocorre porque as concentrações apresentadas são promediadas na vertical e no acoplamento passivo o traçador não se mistura ao longo da profundidade, permanecendo nas camadas verticais aonde estão localizadas as fontes, enquanto que no acoplamento dinâmico o traçador se distribui ao longo da coluna d'água devido às alterações hidrodinâmicas geradas pelos processos induzidos por este tipo de acoplamento.

Tabela 12 – Concentrações promediadas na vertical máximas obtidas com o acoplamento passivo e dinâmico.

Caso teste	Concentração promediada na vertical máxima (kg/m^3)	
	Acoplamento passivo	Acoplamento dinâmico
1	5,70e-06	1,50e-03
2	8,19e-05	7,92e-03
3	2,48e-04	6,25e-03
4	5,54e-04	2,04e-02
5	4,60e-03	5,00e-02
6	5,59e-03	3,02e-02

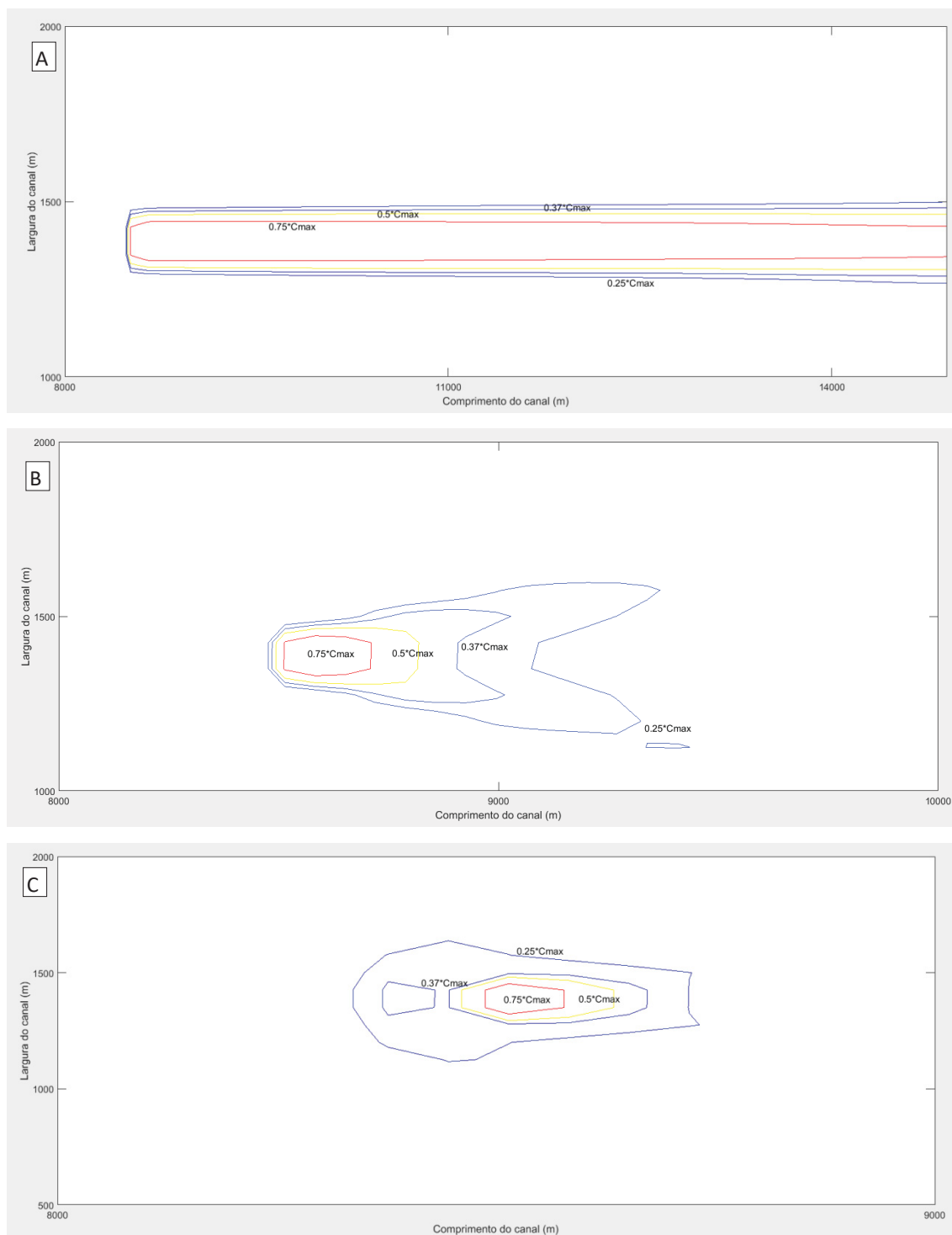


Figura 112 – Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento passivo e a abordagem Euleriana para $Q_0 = 3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 1), (B) 0,25 m/s (caso teste 2) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 3).

Na Figura 112 verifica-se que quanto maior a velocidade do escoamento ambiente, maior a dispersão do traçador, pois a diluição gerada no campo próximo pelo processo de arraste é maior e assim as concentrações impostas às fontes como dado de entrada são me-

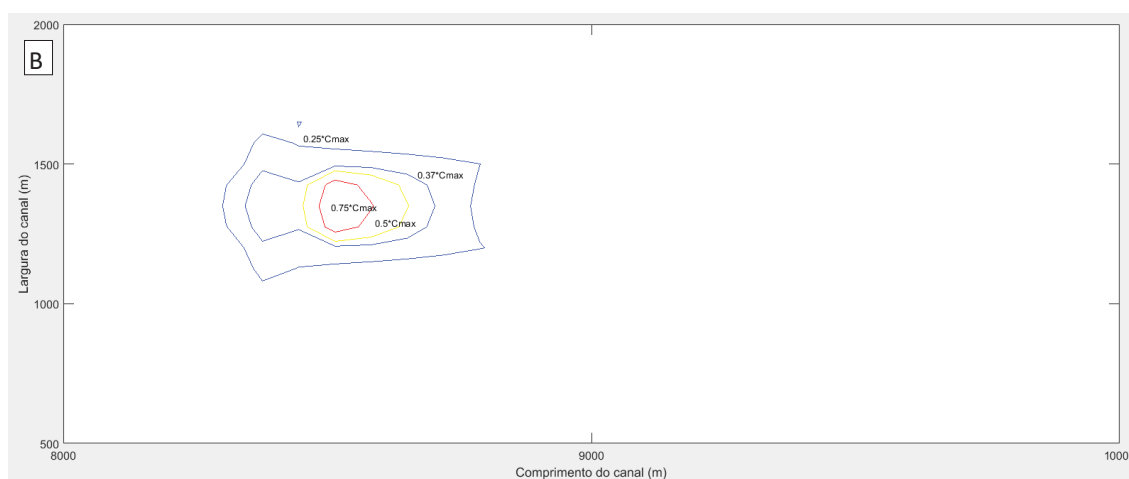
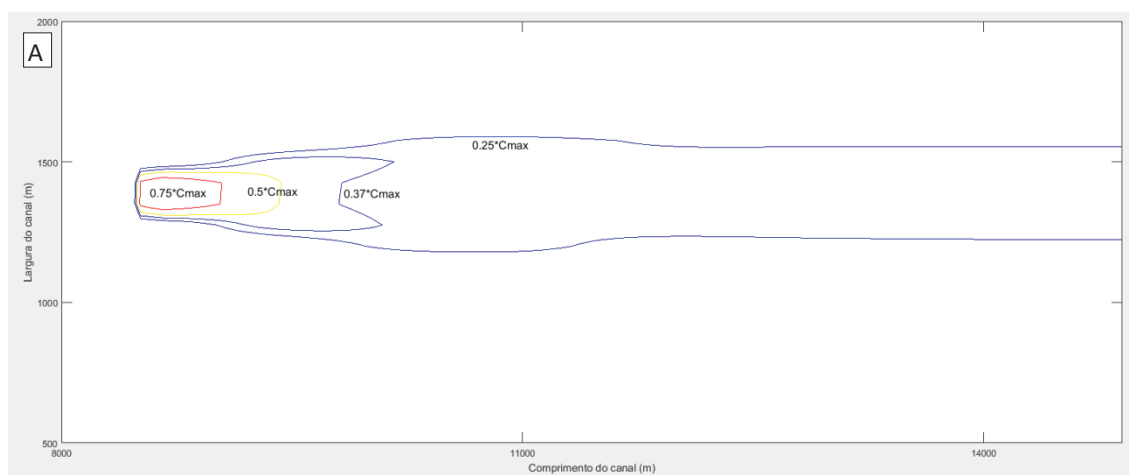
nores. Para as menores velocidades o traçador ocupa somente uma pequena área do canal, como pode ser observado na Tabela 13.

Tabela 13 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de 3,9 m³/s, acoplamento passivo e abordagem Euleriana para diferentes velocidades ambiente.

u_a (m/s)	25% Cmax (%)	37% Cmax (%)	50% Cmax (%)	75% Cmax (%)
1,0	1,57	1,39	1,39	1,39
0,25	0,23	0,1	0,05	0,03
0,11	0,15	0,04	0,02	0,01

A partir dos resultados das porcentagens das áreas que apresentam concentrações induzidas obtidas nos casos testes com lançamento de 3,9 m³/s, observa-se que as mesmas são diretamente proporcionais a velocidade do escoamento ambiente e que somente para a velocidade ambiente de 1,0 m/s as porcentagens das áreas permanecem constantes para 37, 50 e 75% da concentração máxima.

A seguir apresenta-se os resultados obtidos com o acoplamento passivo para uma vazão de efluentes de 40 m³/s.



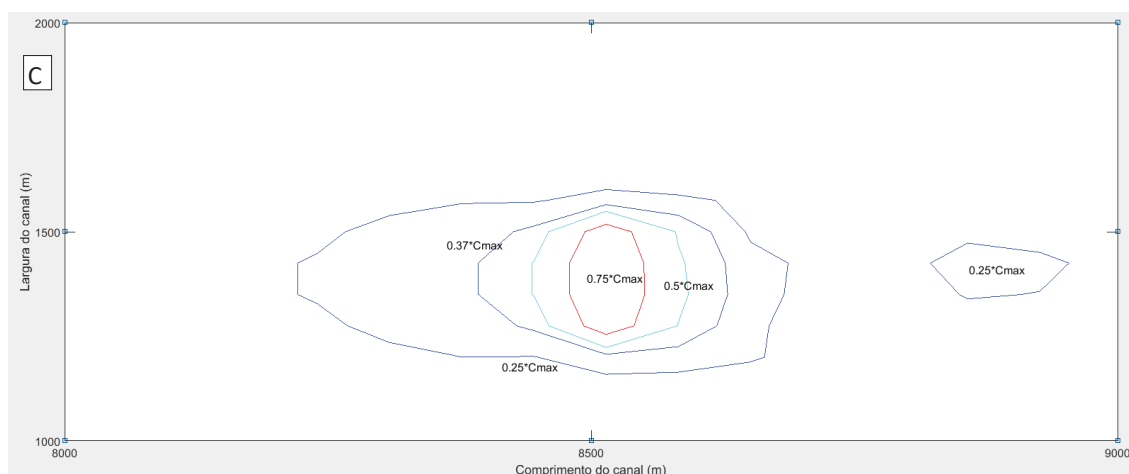


Figura 113 – Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento passivo e a abordagem Euleriana para $Q_0 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 4), (B) 0,25 m/s (caso teste 5) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 6).

O mesmo comportamento dos casos testes 1, 2 e 3, que estão submetidos a uma vazão de lançamento de efluentes de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 112), é observado nos casos testes 4, 5 e 6 que recebem um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 113). A alta velocidade do escoamento ambiente faz com que a pluma de efluentes ocupe uma faixa do domínio que se estende do local de lançamento até o final do canal, enquanto que com as velocidades mais baixas a distribuição de concentrações induzidas fica restrita a uma pequena área do domínio modelado.

Tabela 14 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, acoplamento passivo e abordagem Euleriana para diferentes velocidades ambiente.

u_a (m/s)	25% Cmax (%)	37% Cmax (%)	50% Cmax (%)	75% Cmax (%)
1,0	2,91	0,33	0,14	0,08
0,25	0,18	0,08	0,04	0,02
0,11	0,17	0,06	0,04	0,02

Os resultados quantitativos das porcentagens das áreas ocupadas pelas concentrações induzidas na Tabela 14 ratificam as distribuições espaciais das concentrações apresentadas na Figura 113 e demonstram que a alta vazão de efluentes não altera significativamente quando comparado com os resultados obtidos pela vazão de efluentes menor, mantendo-se a relação de que as áreas com velocidade induzida são diretamente proporcionais a velocidade do escoamento ambiente.

Na sequência são apresentadas as distribuições de concentrações promediadas na vertical obtidas com o acoplamento dinâmico.

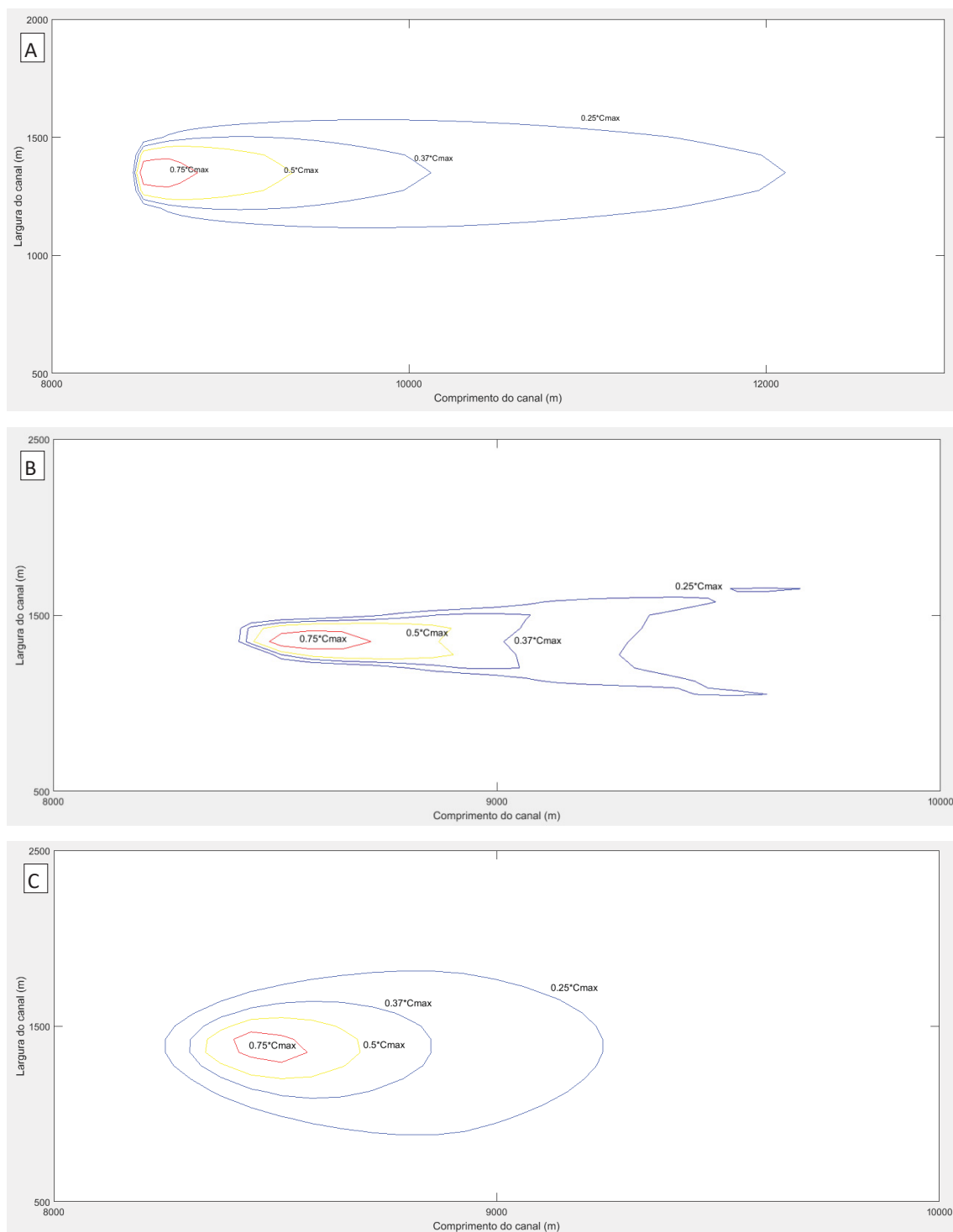


Figura 114 - Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento dinâmico e a abordagem Euleriana para $Q_0 = 3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 1), (B) 0,25 m/s (caso teste 2) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 3).

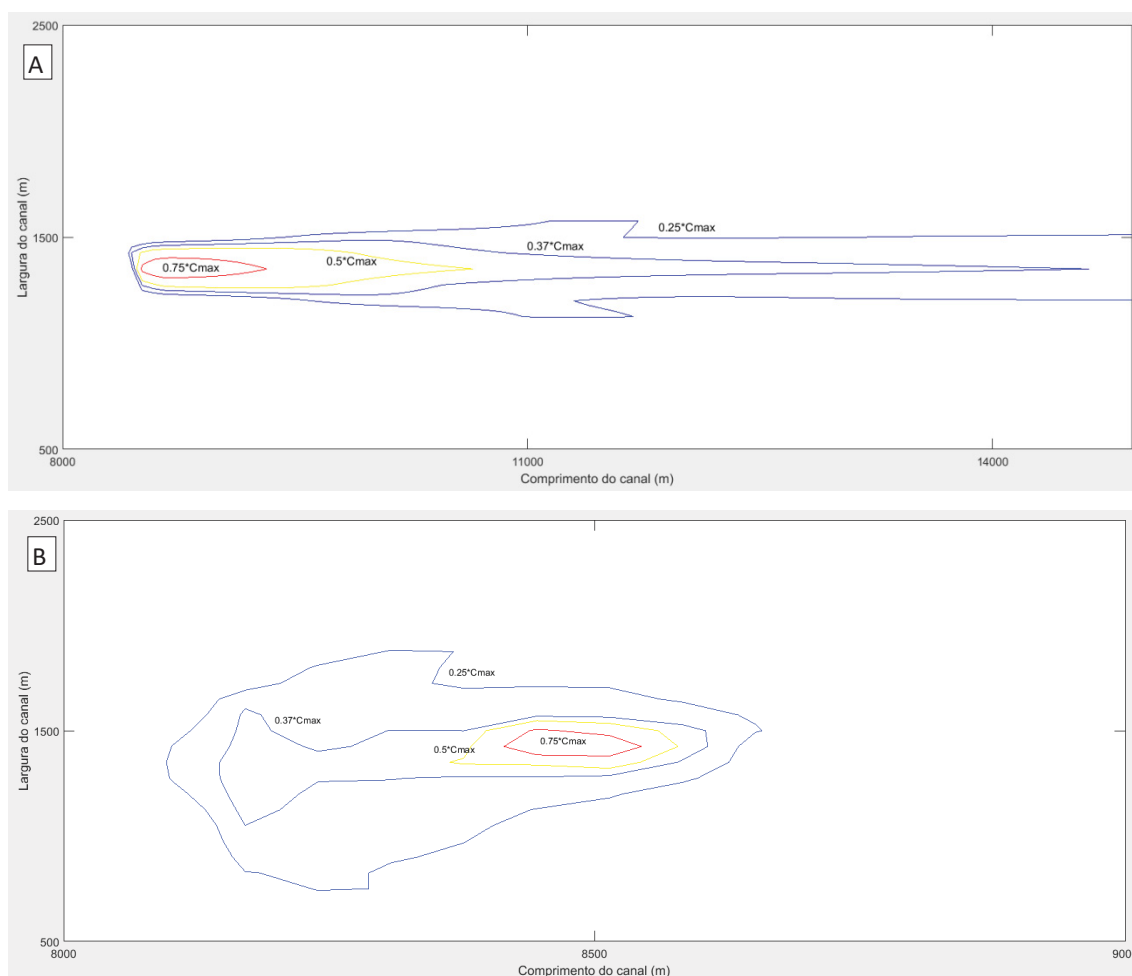
Com o acoplamento dinâmico a pluma de concentrações promediadas na vertical apresentam maior dispersão lateral quando comparada com as obtidas pelo acoplamento passivo.

Como a distribuição de velocidades promediadas na vertical obtidas com o acoplamento passivo e dinâmico são semelhantes para o caso teste 1, este apresentou distribuição de concentrações promediadas na vertical também similares, enquanto que para os outros casos testes (2 e 3) a pluma de efluentes apresentou mais dispersa para o acoplamento dinâmico. Isto pode ser evidenciado tanto na Figura 114 como na Tabela 15.

Tabela 15 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de 3,9 m³/s, acoplamento dinâmico e abordagem Euleriana para diferentes velocidades ambiente.

u_a (m/s)	25% Cmax (%)	37% Cmax (%)	50% Cmax (%)	75% Cmax (%)
1,0	1,27	0,4	0,17	0,03
0,25	0,35	0,15	0,09	0,02
0,11	0,68	0,22	0,09	0,02

Diferentemente dos resultados obtidos com o acoplamento passivo, as áreas com concentrações promediadas na vertical induzidas não diretamente proporcionais a velocidade do escoamento ambiente pois a velocidade de 0,11 m/s gerou, de maneira geral, áreas maiores do a velocidade 0,25 m/s.



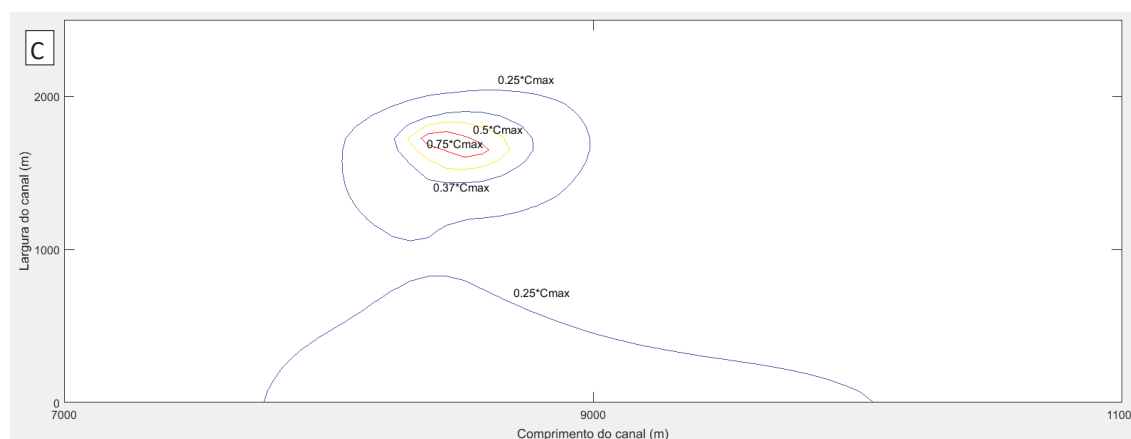


Figura 115 - Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento dinâmico e a abordagem Euleriana para $Q_0 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 5), (B) 0,25 m/s (caso teste 5) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 6).

Verifica-se que diferentemente do caso teste 1, o caso teste 4 apresenta a pluma de concentrações se estendendo até o final do canal. Comparativamente, as áreas com concentrações promediadas na vertical induzidas obtidas pelo acoplamento dinâmico são, de modo geral, maiores do que as obtidas com o acoplamento passivo para os todos os casos testes, pois o acoplamento dinâmico produz maiores alterações hidrodinâmicas e consequentemente gera mais dispersão da pluma de efluentes.

Tabela 16 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, acoplamento dinâmico e abordagem Euleriana para diferentes velocidades ambiente.

u_a (m/s)	25% Cmax (%)	37% Cmax (%)	50% Cmax (%)	75% Cmax (%)
1,0	2,79	0,94	0,34	0,06
0,25	0,37	0,12	0,04	0,02
0,11	1,68	0,2	0,09	0,03

Nota-se que o comportamento observado com o lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ relativo as áreas das concentrações promediadas na vertical induzidas em ambientes com velocidade de 0,11 m/s serem maiores do que as em ambientes com 0,25 m/s repete-se para o lançamento e $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

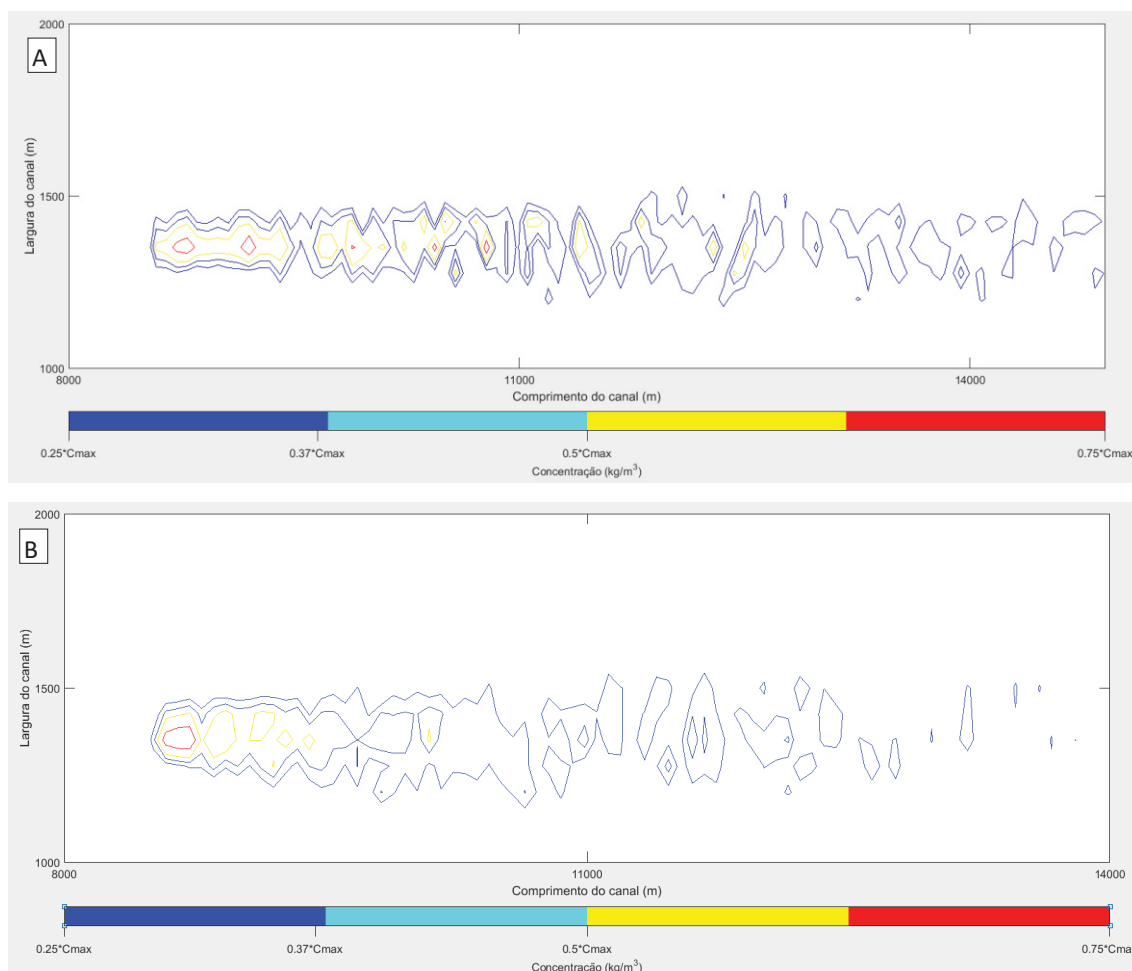
Ressalta-se que a análise da dispersão com abordagem Euleriana é extremamente sensível às dimensões das células da grade na região fonte do modelo numérico de campo afastado. No caso do acoplamento nulo que não considera os processos de mistura do campo próximo, a diluição inicial é determinada pelas dimensões da região fonte. Nos acoplamentos passivo e dinâmico a concentração do traçador ao final do campo próximo é determinada pelo modelo do campo próximo para depois ser distribuída nas células da grade do

modelo do campo afastado, o que pode gerar neste caso uma diluição numérica excessiva, enquanto que no caso do acoplamento nulo a diluição inicial pode tanto ser super ou subestimada dependendo do tamanho da região fonte.

4.7.2 Abordagem Lagrangeana

As mesmas análises realizadas com a abordagem Euleriana são realizadas com a abordagem Lagrangeana, sendo apresentados primeiro os resultados obtidos com o acoplamento passivo seguidos pelos resultados do acoplamento dinâmico.

Na abordagem Lagrangeana as partículas (fluxo de massa) são inseridas na hidrodinâmica do ambiente gerada com o acoplamento passivo e com o acoplamento dinâmico conforme apresentado no item 3.3.4.2. e a seguir são apresentados os resultados referente somente a inserção de fontes não diluídas tanto para ambos acoplamentos.



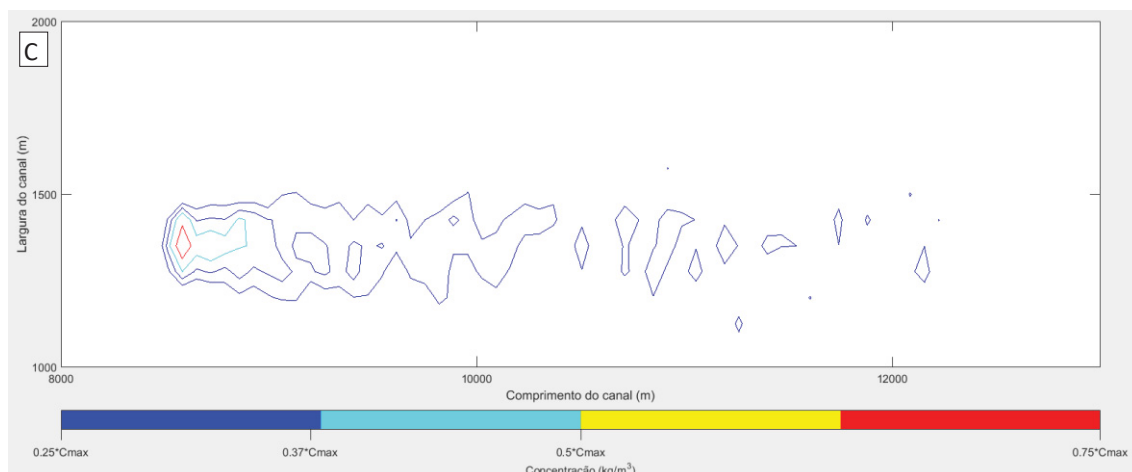


Figura 116 – Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento dinâmico e a abordagem Lagrangeana para $Q_0 = 3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 1), (B) 0,25 m/s (caso teste 2) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 3).

Na Figura 116 observa-se que a largura das plumas é inversamente proporcional a velocidade do escoamento ambiente concordando com o comportamento hidrodinâmico, enquanto que a área com concentração induzida é diretamente proporcional (Tabela 17), pois quanto maior a velocidade do escoamento maior a distância que as partículas conseguem alcançar.

Tabela 17 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$, acoplamento passivo e abordagem Lagrangeana para diferentes velocidades ambiente.

u_a (m/s)	25% Cmax (%)	37% Cmax (%)	50% Cmax (%)	75% Cmax (%)
1,0	1,0	0,41	0,17	0,04
0,25	0,78	0,26	0,08	0,02
0,11	0,51	0,13	0,03	0,01

Comparando-se os resultados da Tabela 13 com a Tabela 17 verifica-se que as áreas com concentração promediada na vertical induzida se reduzem a medida que a velocidade ambiente diminui independentemente do tipo de abordagem.

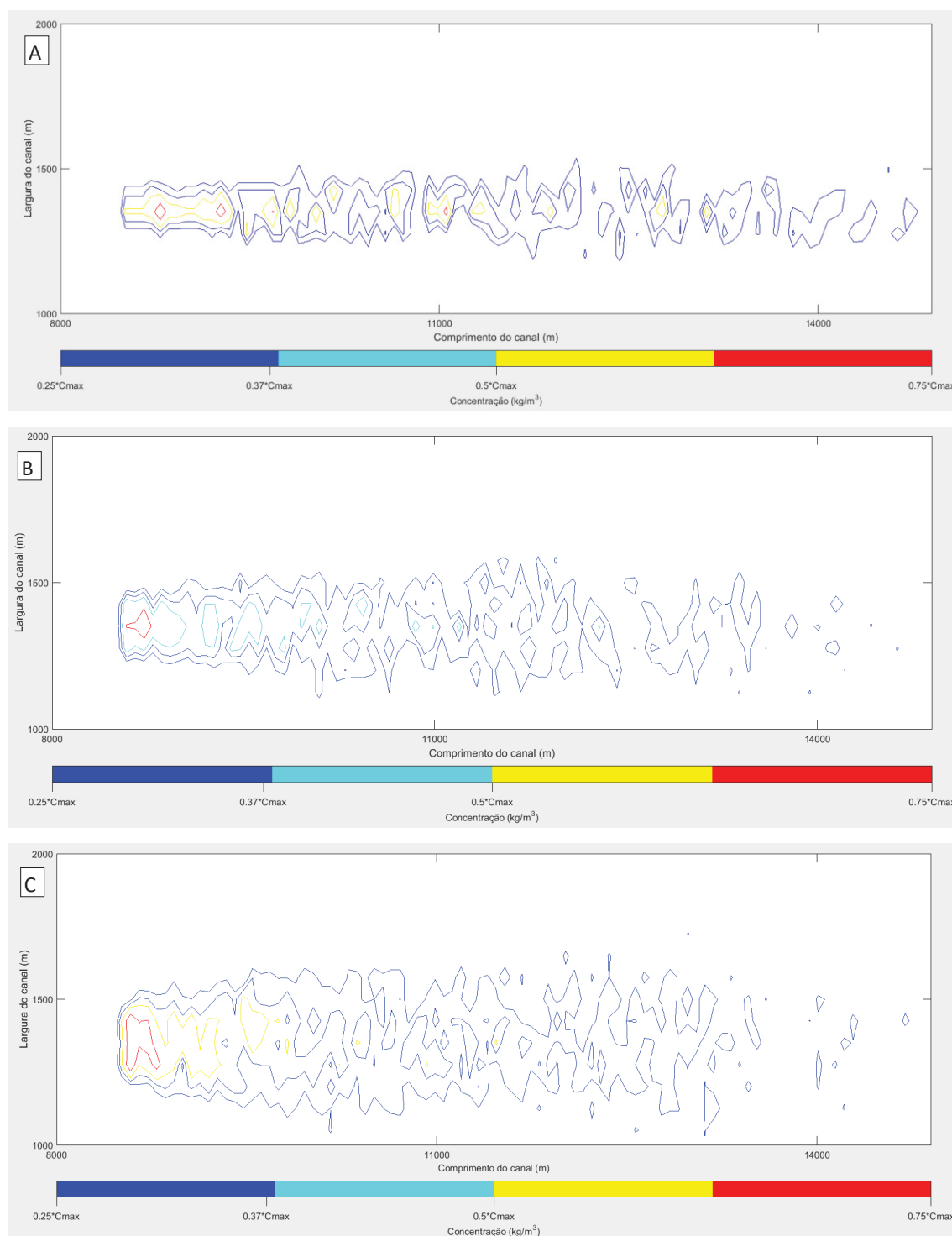


Figura 117 – Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento passivo e a abordagem Lagrangeana para $Q_0 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 4), (B) 0,25 m/s (caso teste 5) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 6).

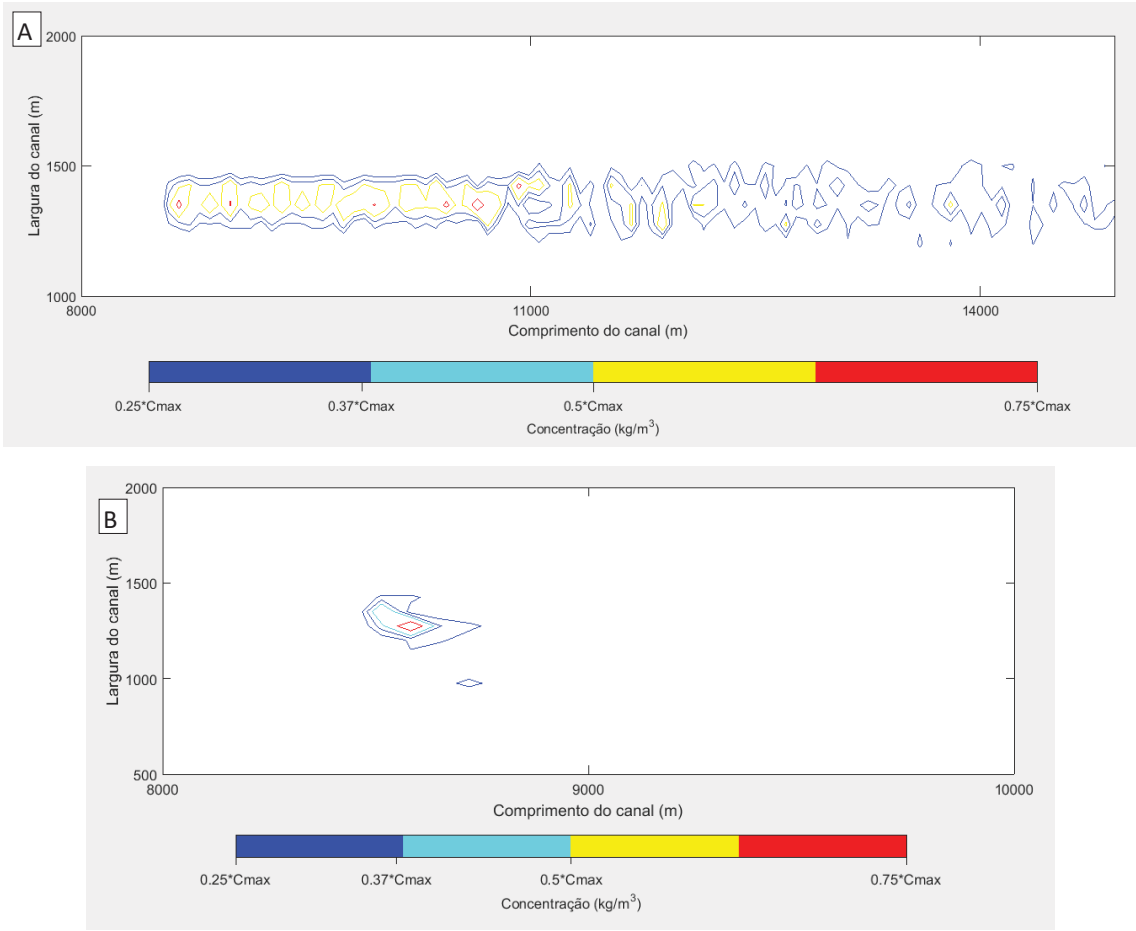
Na Figura 117 observa-se comportamento semelhante aos casos testes análogos com baixa vazão de efluentes no que tange a largura da pluma, porém com alta vazão do lançamento a pluma de efluentes com concentrações maiores do que 25% da concentração má-

xima se estendeu quase até o final do canal para todas as velocidades ambiente, resultando em áreas com concentrações induzidas maiores com a menor a velocidades ambiente (Tabela 18).

Tabela 18 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de 40 m³/s, acoplamento passivo e abordagem Lagrangeana para diferentes velocidades ambiente.

u_a (m/s)	25% Cmax (%)	37% Cmax (%)	50% Cmax (%)	75% Cmax (%)
1,0	1,11	0,47	0,16	0,02
0,25	1,32	0,41	0,17	0,02
0,11	1,80	0,57	0,19	0,04

Na sequência são apresentados os resultados referentes a distribuição de concentrações promediadas na vertical geradas com acoplamento dinâmico e a abordagem Lagrangeana.



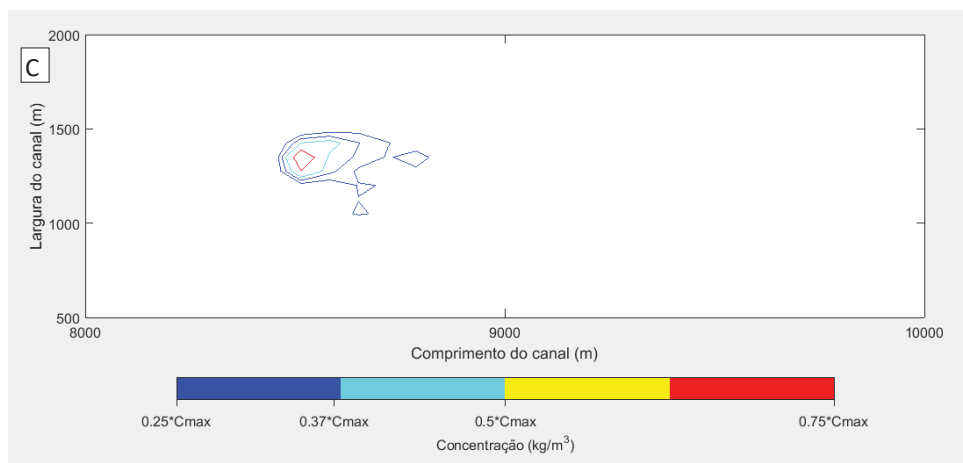


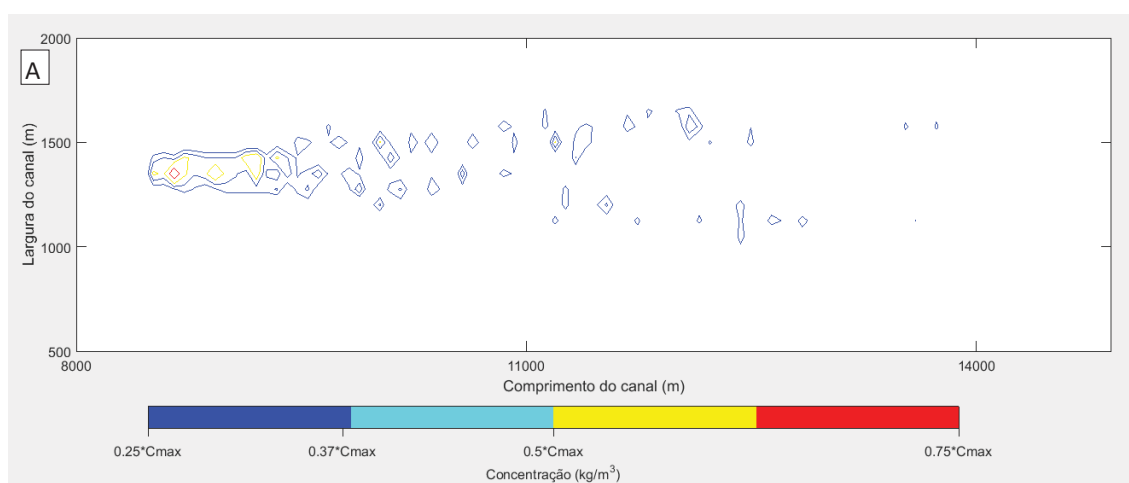
Figura 118 - Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento dinâmico e a abordagem Lagrangeana para $Q_0 = 3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 1), (B) 0,25 m/s (caso teste 2) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 3).

Com exceção do caso teste 1, os demais apresentaram plumas extremamente pequenas, não chegando a atingir a 1% da área do canal. As áreas são menores que as áreas obtidas com os casos testes correspondentes tanto com a abordagem Lagrangeana e acoplamento passivo, e com a abordagem Euleriana e acoplamento dinâmico.

Tabela 19 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$, acoplamento dinâmico e abordagem Lagrangeana para diferentes velocidades ambiente.

u_a (m/s)	25% Cmax (%)	37% Cmax (%)	50% Cmax (%)	75% Cmax (%)
1,0	1,36	0,58	0,25	0,03
0,25	0,05	0,02	0,01	0,005
0,11	0,06	0,04	0,02	0,005

Com as velocidades induzidas por um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ foram geradas as distribuições de concentrações promediadas na vertical que se segue.



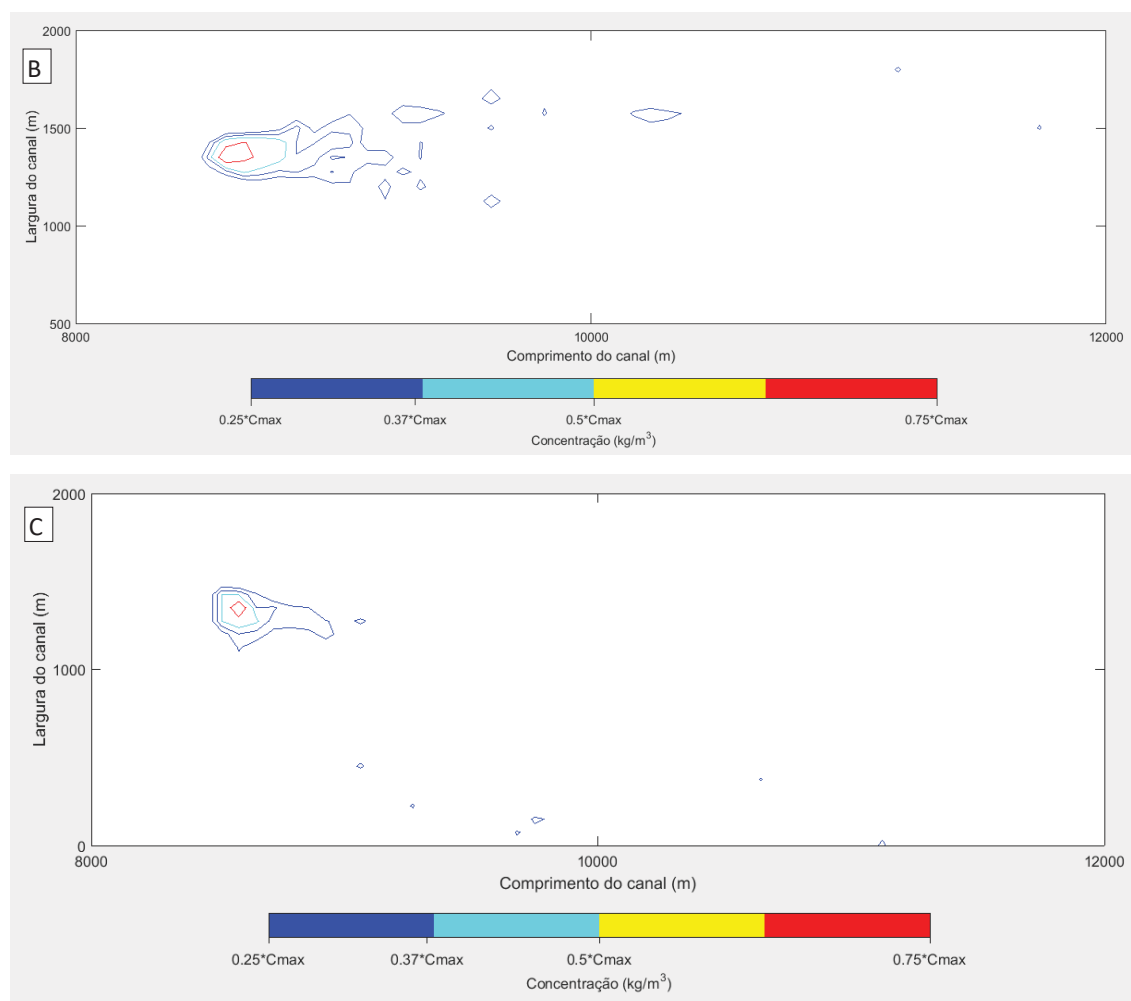


Figura 119 - Isolinhas de concentrações promediadas na vertical de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com o acoplamento dinâmico e a abordagem Lagrangeana para $Q_0 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ realizados em um escoamento ambiente com velocidade de (A) 1,0 m/s (caso teste 4), (B) 0,25 m/s (caso teste 5) e, (C) 0,11 m/s (caso teste 6).

Observa-se, na Figura 119, que as áreas com concentrações promediadas na vertical induzidas são, em geral, um pouco maiores do que as dos casos testes correspondentes com lançamento de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$, porém bem menores do que as outras situações análogas.

Tabela 20 – Porcentagem da área do domínio com concentrações promediadas na vertical induzidas maiores do que 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima obtidas com um lançamento de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, acoplamento dinâmico e abordagem Lagrangeana para diferentes velocidades ambiente.

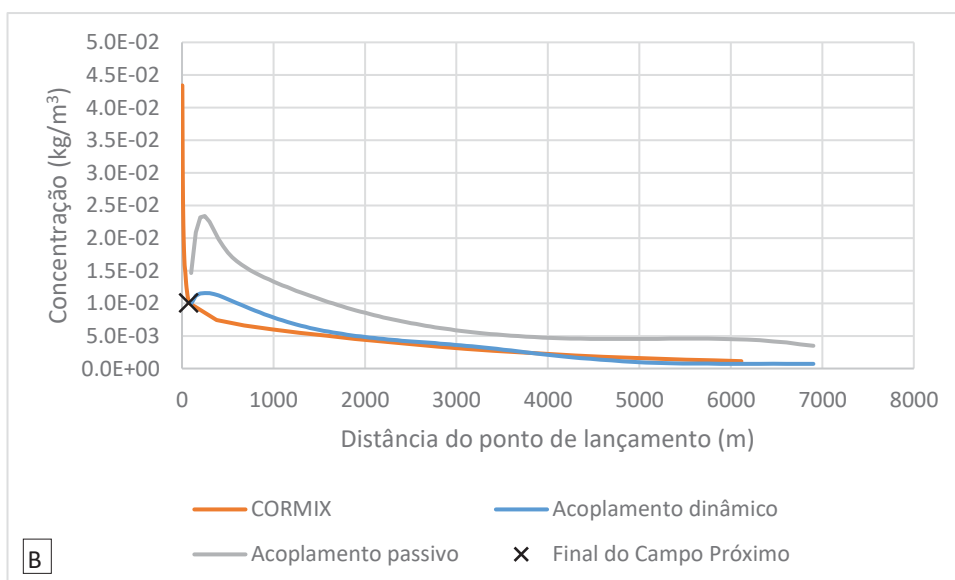
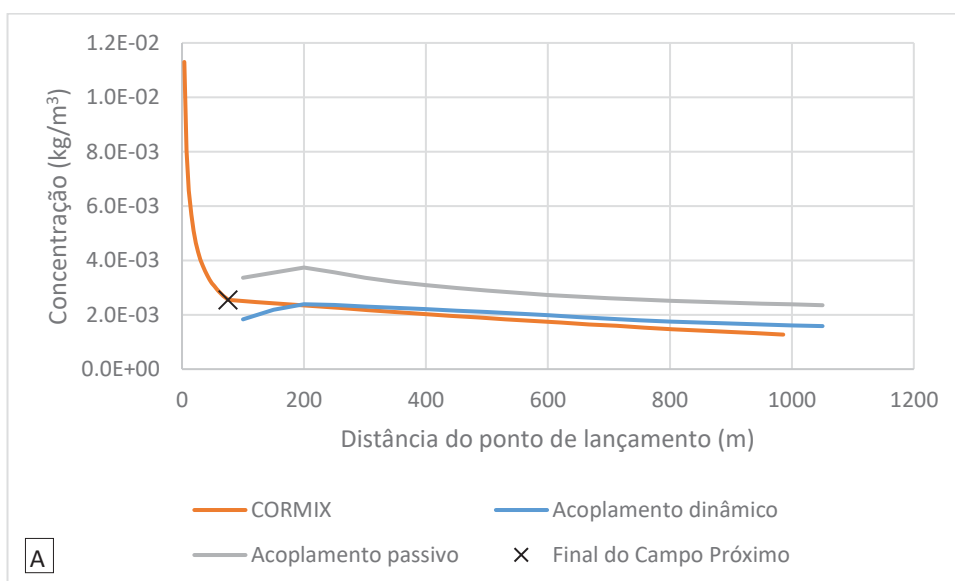
u_a (m/s)	25% Cmax (%)	37% Cmax (%)	50% Cmax (%)	75% Cmax (%)
1,0	0,46	0,2	0,06	0,005
0,25	0,23	0,09	0,05	0,02
0,11	0,14	0,04	0,02	0,005

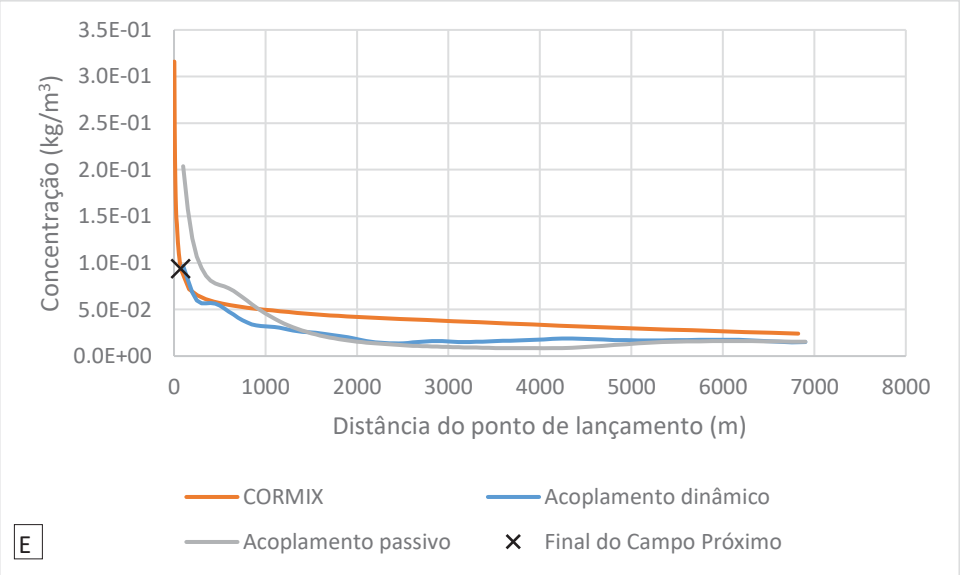
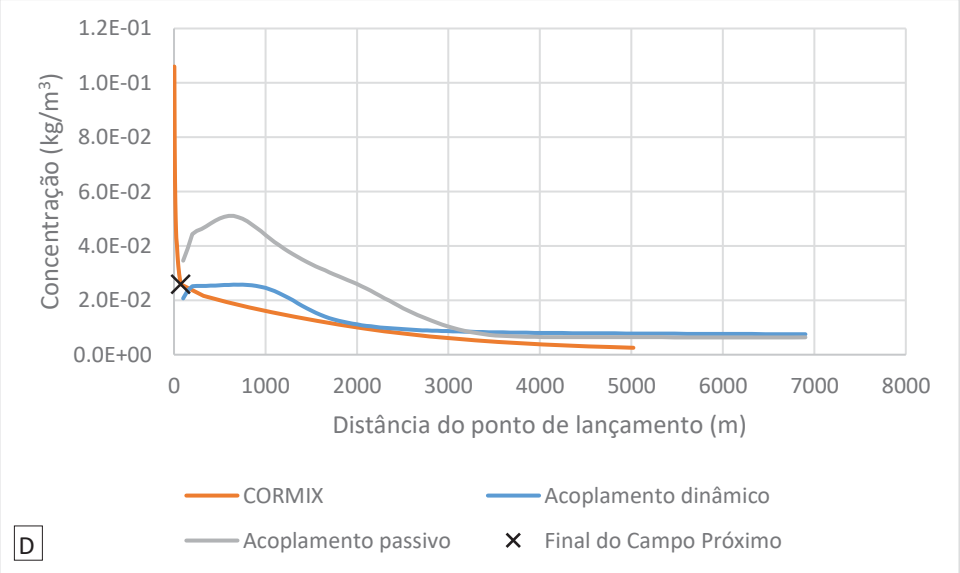
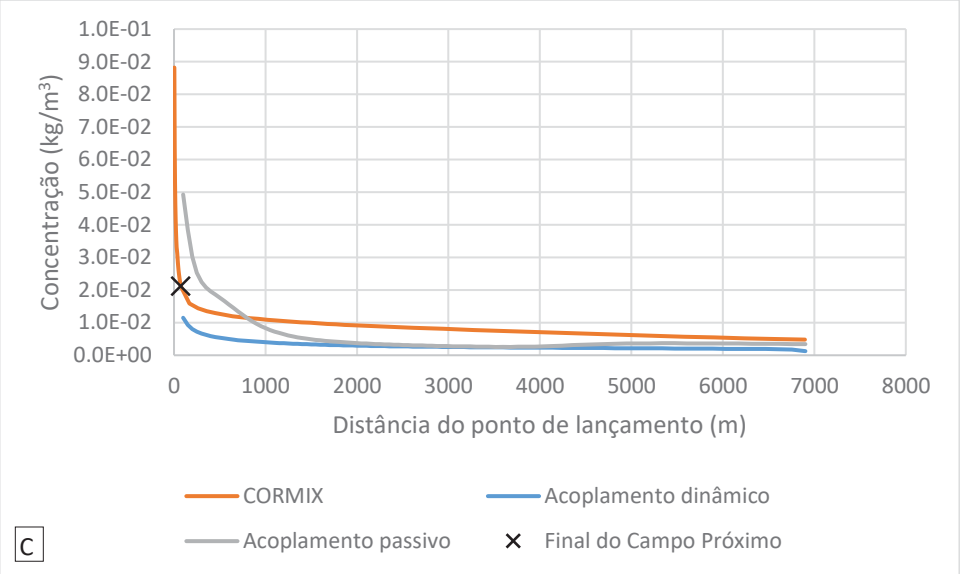
Analisando-se a Tabela 20 nota-se que as áreas com concentrações promediadas na vertical induzidas, embora pequenas, são diretamente proporcionais a velocidade do ambiente.

4.7.3 Comparação com resultados do CORMIX

Para verificar se as concentrações obtidas com os acoplamentos passivo e dinâmico apresentam coerência, estes foram comparados com os resultados do CORMIX para os diferentes casos testes em regime permanente. Esta comparação foi efetuada somente com os resultados da abordagem Euleriana.

A seguir são apresentados os gráficos comparativos para cada caso teste, considerando as concentrações obtidas ao final do campo próximo na camada da superfície com o acoplamento passivo e dinâmico.





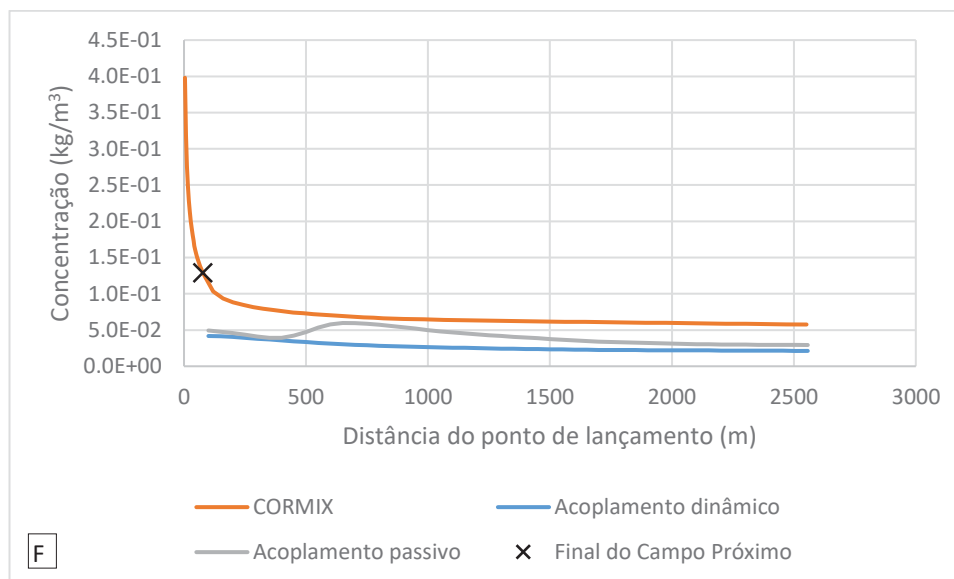


Figura 120 – Gráficos comparativos entre as concentrações determinadas pelo CORMIX e as obtidas com o acoplamento passivo e dinâmico para (A) caso teste 1, (B) caso teste 2, (C) caso teste 3, (D) caso teste 4, (E) caso teste 5 e (F) caso teste 6.

Analisando-se a Figura 120 nota-se qualitativamente que os casos testes que apresentaram as maiores porcentagens de áreas com velocidade induzida, caso teste 6, 5 e 3, (ver Figura 82) foram os mesmos que apresentaram as concentrações obtidas com o acoplamento dinâmico mais afastadas das concentrações determinadas pelo CORMIX.

Verifica-se também, com exceção do caso teste 6, que as maiores diferenças entre as concentrações obtidas entre o acoplamento passivo e dinâmico ocorrem próximos ao final do campo próximo, local este que apresentou as maiores diferenças hidrodinâmicas.

4.8 RESUMO DA ANÁLISE DA DISPERSÃO

Um resumo dos resultados obtidos na dispersão dos efluentes simulados com a abordagem Euleriana e Lagrangeana é apresentado neste item. Verificou-se que os resultados referentes às áreas com concentrações promediadas na vertical induzidas obtidas com as diferentes abordagens apresentam grande diferença quando deveriam ser similares. Esta diferença pode ter sido causada pela composição de alguns fatores como: (i) a imposição de um coeficiente de dispersão vertical baixo que fez com que a pluma de partículas fosse distribuída somente na camada superior da coluna d'água, e posteriormente a determinação de valores de concentração promediada na vertical gerou valores muito baixos; (ii) a localização das fontes de lançamento de partículas não foi apropriada principalmente para os casos onde o lançamento gerava fluxos em contracorrente ao escoamento ambiente; e (iii) a

quantidade de partículas pode ter sido baixa para representar os lançamentos simulados. De modo a ilustrar estas possíveis causas descritas, apresenta-se a Figura 121 e Figura 122, respectivamente do caso teste 1 e 6.

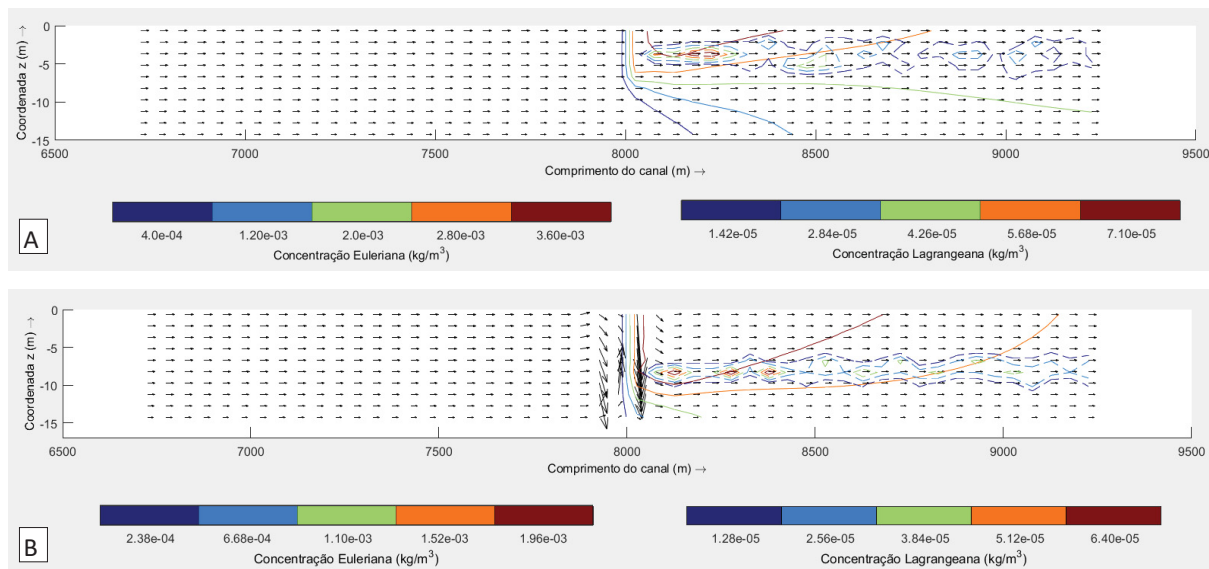


Figura 121 – Sobreposição do campo de velocidades, isolinhas de concentração Euleriana (-) e isolinhas de concentração Lagrangeana (--) em um trecho da seção longitudinal aonde se localiza o ponto de lançamento (N=20) obtido com o acoplamento (A) passivo e (B) dinâmico para o caso teste 1. Os vetores estão projetados no plano xz com escala horizontal de $1 \text{ m/s} = 20\text{m}$ e escala vertical 20 vezes maior do que a escala horizontal.

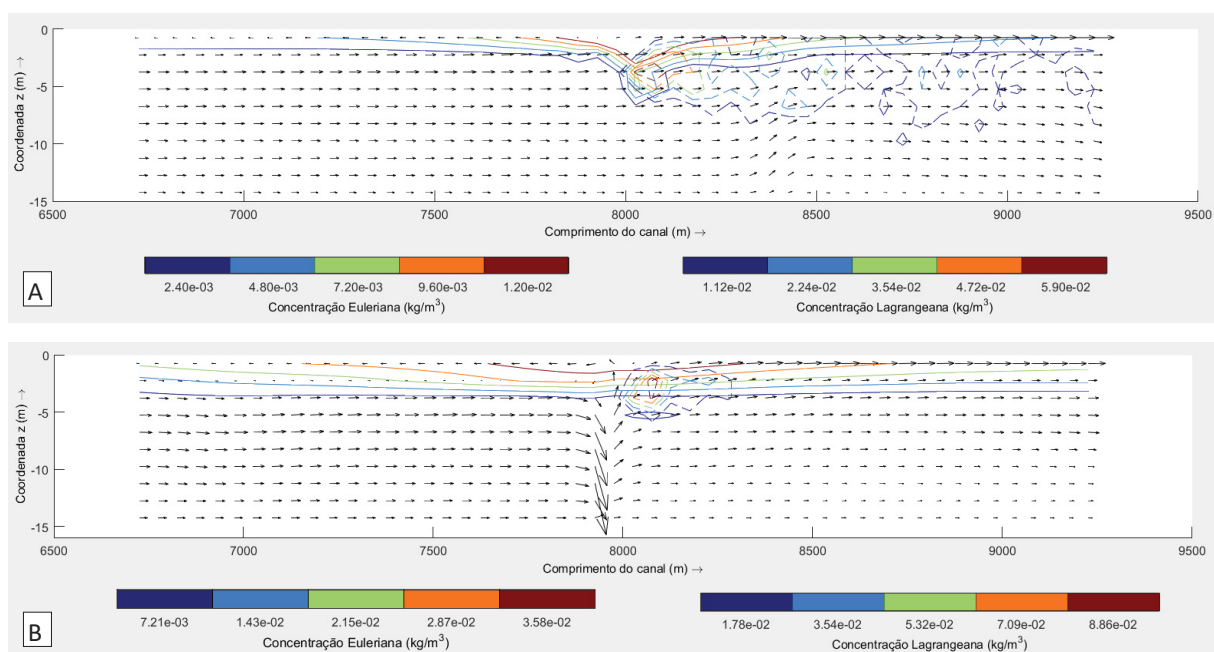


Figura 122 - Sobreposição do campo de velocidades, isolinhas de concentração Euleriana (-) e isolinhas de concentração Lagrangeana (--) em um trecho da seção longitudinal aonde se localiza o ponto de lançamento (N=20) obtido com o acoplamento (A) passivo e (B) dinâmico para o caso teste 6. Os vetores estão projetados no plano xz com escala horizontal de $1 \text{ m/s} = 200\text{m}$ e escala vertical 30 vezes maior do que a escala horizontal.

A análise da dispersão foi realizada com o objetivo de verificar se as concentrações refletem as alterações hidrodinâmicas observadas nas simulações dos casos testes em regime permanente.

Desta forma apresenta-se nas tabelas que se seguem os resultados das áreas com velocidades e concentrações promediadas na vertical induzidas para cada caso teste e para os tipos de acoplamento.

Tabela 21 – Porcentagens das áreas e concentrações promediadas na vertical induzidas geradas pelos casos testes com o acoplamento dinâmico.

Caso teste	Área vel. Induzida (%)			Área conc. Induzida Euleriana				Área conc. Induzida Lagrangeana			
	1%	5%	10%	25%	37%	50%	75%	25%	37%	50%	75%
1	2,98	0,36	0,13	1,27	0,4	0,17	0,03	1,36	0,58	0,25	0,03
2	19,24	0,74	0,1	0,35	0,15	0,09	0,02	0,05	0,02	0,01	0,005
3	37,08	7,87	0,69	0,68	0,22	0,09	0,02	0,06	0,04	0,02	0,005
4	6,65	1,56	0,34	2,79	0,94	0,34	0,06	0,46	0,2	0,06	0,005
5	53,46	4,58	0,85	0,37	0,12	0,04	0,02	0,23	0,09	0,05	0,02
6	70,41	19,79	12,10	1,68	0,2	0,09	0,03	0,14	0,04	0,02	0,005

Observa-se na Tabela 21 que não há uma relação direta entre as áreas de velocidade induzida com as áreas de concentração promediadas na vertical induzida (abordagem Euleriana e Lagrangeana), uma vez que de modo geral os casos testes apresentam áreas com velocidade e concentração promediadas na vertical induzida decrescente na seguinte ordem:

- Velocidade induzida: T6, T5, T3, T2, T4, T1
- Concentração induzida Euleriana: T4, T1, T3, T6, T2, T5
- Concentração induzida Lagrangeana: T1, T4, T5, T6, T3, T2

Tabela 22 – Porcentagens das áreas e concentrações promediadas na vertical induzidas geradas pelos casos testes com o acoplamento passivo.

Caso teste	Área vel. Induzida (%)			Área conc. Induzida Euleriana				Área conc. Induzida Lagrangeana			
	1%	5%	10%	25%	37%	50%	75%	25%	37%	50%	75%
1	1,45	0	0	1,57	1,39	1,39	1,39	1	0,41	0,17	0,04
2	20,25	0,94	0	0,23	0,1	0,05	0,03	0,78	0,26	0,08	0,02
3	31,03	4,99	0,30	0,15	0,04	0,02	0,01	0,51	0,13	0,03	0,01
4	5,23	0,18	0	2,91	0,33	0,14	0,08	1,11	0,47	0,16	0,02
5	31,71	5,26	0,81	0,18	0,08	0,04	0,02	1,32	0,41	0,17	0,02
6	71,08	28,09	3,89	0,17	0,06	0,04	0,02	1,80	0,57	0,19	0,04

Na Tabela 22, nota-se que também não há relação entre as áreas com velocidade induzida e as áreas com concentração promediadas na vertical induzida. Entretanto, é possível verificar que a ordem decrescente de áreas com velocidade induzida é igual ao do acoplamento dinâmico e que as áreas com concentração promediadas na vertical induzida com abordagem Euleriana apresentam uma relação diretamente proporcional com a velocidade

do escoamento ambiente. Já para as áreas com concentração promediadas na vertical induzida com abordagem Lagrangeana não foi possível estabelecer uma ordem decrescente entre as porcentagens de 25, 37, 50 e 75% da concentração máxima, conforme pode ser visto na lista abaixo:

- Velocidade induzida: T6, T5, T3, T2, T4, T1
- Concentração induzida Euleriana: T1, T4, T2, T5, T6, T3
- Concentração induzida Lagrangeana:
 - 25%: T6, T5, T4, T1, T2, T3
 - 37%: T6, T4, T5, T1, T2, T3
 - 50%: T6, T5, T1, T4, T2, T3
 - 75%: T6, T1, T5, T4, T2, T3

De modo geral, nota-se que as áreas com velocidades induzidas são função da relação entre a vazão de efluentes e a velocidade do escoamento ambiente enquanto as áreas com concentrações promediadas na vertical induzidas com abordagem Euleriana são função da velocidade ambiente.

As alterações hidrodinâmicas foram mais significativas nas camadas mais próximas a superfície e como as áreas com concentrações induzidas foram calculadas a partir das concentrações promediadas na vertical, este fato pode ter tido grande influência nestes resultados, fazendo com que estas áreas ficassem subestimadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Jatos e plumas provenientes de emissários submarinos ou subfluviais constituem escoamentos complexos que estão sujeitos a diferentes processos de mistura. Estes ocorrem em escalas temporais e espaciais bastante distintas, de modo que a sua modelagem é realizada por diferentes modelos, sendo utilizados nesta tese o CORMIX para o campo próximo e intermediário e o Delft3D-FLOW para o campo afastado.

Dentro desta perspectiva alguns trabalhos vêm sendo realizados com enfoque na dispersão de concentrações de traçadores, salinidade e/ou temperatura. De modo a complementar o conhecimento nesta área de interação e acoplamento entre modelos de campo próximo e afastado de lançamentos de emissários submersos, a presente tese objetivou análises das alterações hidrodinâmicas geradas no campo afastado pela hidrodinâmica do campo próximo.

Para responder as perguntas de pesquisa e conseqüentemente atingir os objetivos desta tese foram realizadas as seguintes ações:

- Foram implementados o acoplamento nulo, passivo e dinâmico para diferentes combinações de vazão ambiente e vazão do efluente para um domínio genérico simplificado em casos testes em regime permanente e em regime não permanente. Como os resultados do acoplamento nulo e passivo ficaram muito semelhantes, somente os resultados do acoplamento passivo foram analisados juntamente com os resultados do acoplamento dinâmico;
- Foram analisadas qualitativamente as alterações hidrodinâmicas a partir da visualização de perfis verticais de velocidade e densidade, velocidades em planta, em perfis longitudinais e transversais, e quantitativamente a partir da determinação das áreas com velocidades promediadas na vertical induzidas. Para os casos testes em regime não permanente foi realizada somente a análise qualitativa. Os resultados obtidos comprovam, conforme indicado pela literatura, que altas vazões de efluentes lançados em ambientes com velocidades menores geram alterações mais significativas;
- Verificou-se que para todos os casos testes houve alterações hidrodinâmicas quando comparados os resultados da hidrodinâmica obtida com o acoplamento

dinâmico e com o acoplamento nulo e passivo. Conclui-se, portanto, que o acoplamento dinâmico gera alterações hidrodinâmicas no escoamento ambiente;

- Foram aplicados os critérios de instabilidade do campo próximo (Critério 1), o critério da quantidade de movimento distribuída ao longo da profundidade (Critério 2) e o critério de Froude (número de Froude do ambiente) aos diferentes casos testes para validar os resultados das alterações hidrodinâmicas. Confrontando-se estes resultados com os resultados da análise qualitativa e quantitativa das alterações hidrodinâmicas foi possível concluir que o Critério 1, o Critério 2 juntamente com o Critério de Froude devem ser analisados em conjunto para a definição do tipo de acoplamento mais apropriado partindo-se de dados relativos ao lançamento e ao escoamento ambiente. A partir desta análise conclui-se que apenas os casos testes 5 e 6 necessitam utilizar o acoplamento dinâmico para não gerar resultados menores do que o esperado e consequentemente impactos ambientais subestimados;
- Ainda relacionado à definição de um critério que indique qual o acoplamento mais apropriado gerou-se uma equação da porcentagem da área com velocidade induzida em função do Critério 2 a partir da regressão não linear dos dados dos casos testes. A aplicação desta equação a alguns emissários submarinos demonstrou que a mesma não é válida para qualquer situação pois gerou um valor de porcentagem de área com velocidade induzida negativa;
- Simulou-se a dispersão de um traçador não conservativo sob a perspectiva Euleriana e Lagrangeana para os diferentes casos testes com o acoplamento passivo e dinâmico, tendo sido gerados a distribuição de concentrações promediadas na vertical induzidas e as porcentagens da área do canal com concentrações promediadas na vertical superiores à 25, 37, 50 e 75% da concentração promediada na vertical máxima de cada caso teste simulado;
- As distribuições de concentrações promediadas na vertical obtidas com as abordagens Euleriana e Lagrangeana foram bastante distintas entre si e não apresentaram relação direta com as alterações hidrodinâmicas geradas pela aplicação dos acoplamentos passivo e dinâmico. Isto se justifica pelo fato de se ter utilizado concentrações promediadas na vertical, pois observando as distribuições das concentrações Eulerianas ao longo de trechos de seções longitudinais, nota-se

uma coerência entre as alterações hidrodinâmicas e as isolinhas de concentração. Esta coerência é confirmada pela comparação entre as concentrações geradas com o CORMIX e os resultados das simulações da dispersão do traçador, tanto com o acoplamento passivo e dinâmico, para a abordagem Euleriana. Este comportamento não é observado na distribuição de concentrações obtidas com a abordagem Lagrangeana devido principalmente a escolha da localização das fontes.

Deve-se atentar ao fato de que o algoritmo atual do acoplamento dinâmico atua extraíndo e adicionando somente fluxos volumétricos sobre as coordenadas da linha central do jato/pluma ao longo do campo próximo sem considerar a área do jato/pluma, assim como não trabalha com a adição e extração de fluxos de quantidade de movimento. Este processo resulta em uma diminuição exagerada da velocidade a montante do lançamento, especialmente em casos onde a velocidade do escoamento ambiente é baixa comparada com a velocidade do lançamento (ver Figura 63, por exemplo). Desta forma, o campo de velocidades em regiões muito próximas aos pontos de extração e adição de fluxos volumétricos devido a aplicação do método DESA não são recomendados para análise, devendo ser avaliados cautelosamente. A jusante do final do campo próximo os resultados melhoram.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Diante do exposto, recomenda-se a implementação da extração e inclusão de fluxos volumétricos considerando a área do jato/pluma ao longo do campo próximo no algoritmo do acoplamento dinâmico para o aprimoramento das velocidades no campo afastado. Este processo está atualmente em desenvolvimento pela Deltares sob o nome de COSUMO (*COupled SUBgrid MOdel*). Este novo algoritmo também precisará ser analisado com casos testes como os executados nesta tese.

Recomenda-se também a implementação da extração e inclusão de fluxos de quantidade de movimento nas equações governantes desenvolvendo um método similar ao DESA para aprimorar os resultados do acoplamento.

Finalmente, recomenda-se um estudo mais aprofundado na dispersão da pluma de efluentes, trabalhando-se melhor com os parâmetros de entrada dos modelos de transporte Euleriano e Lagrangeano, para avaliar a influência dos acoplamentos neste processo.

REFERÊNCIAS

- ABESSA, Denis M S *et al.* Influence of a Brazilian sewage outfall on the toxicity and contamination of adjacent sediments. *Marine pollution bulletin*, v. 50, n. 8, p. 875–85, ago. 2005. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16115504>>. Acesso em: 14 ago. 2013.
- AKAR, Paul J.; JIRKA, Gerhard H. Buoyant Spreading Processes in Pollutant and Mixing. Part II: upstream spreading in weak ambient current. *Hydraulic Research*, v. 33, n. 1, p. 87–100, 1995.
- AKAR, Paul J.; JIRKA, Gerhard H. Buoyant Spreading Processes in Pollutant Transport and Mixing. Part I: Lateral spreading with ambient current. *Hydraulic Research*, v. 32, n. 6, p. 815–831, 1994.
- AKAR, Paul J.; JIRKA, Gerhard H. *CORMIX2: An Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Multiport Diffuser Discharges*. . New York: [s.n.], 1991.
- ANDRADE, Rodrigo Campos De. *Uma nova abordagem para a solução numérica de problemas de advecção e difusão multidimensional em corpos de águas naturais*. 2006. 176 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.
- BAPTISTELLI, Silene Cristina. *Análise crítica da utilização de modelagem matemática na avaliação da dispersão de efluentes leves no litoral da Baixada Santista (Estado de São Paulo)*. 2008. 314 f. Universidade de São Paulo, 2008.
- BLENINGER, Tobias. *Coupled 3D hydrodynamic models for submarine outfalls: Environmental hydraulic design and control of multiport diffusers*. 2006. 248 f. Universität Karlsruhe, 2006.
- BLENINGER, Tobias; JIRKA, G H. Near- and far-field model coupling methodology for wastewater discharges. 2004, [S.l: s.n.], 2004. p. 6.
- BLUMBERG, Alan F.; MELLOR, George L. A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model. In: HEAPS, NORMAN S. (Org.). . *Three Dimensional Coastal Ocean Models*. American G ed. Washington, DC: [s.n.], 1987. p. 1–16.
- BLUMBERG, Alan F; JI, Zheng-Gang; ZIEGLER, C Kirk. Modeling Outfall Plume Behavior Using Far Field Circulation Model. *Hydraulic Engineering*, v. 122, n. 11, p. 610–616, 1996.
- BOGLE, G. V.; VALIOULIS, I. A.; MEIORIN, L. Estimation of Far-Field Dilution in Ocean Waste Discharges. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 119, n. 1, p. 15–29, 1993.
- BOTELHO, D. A. *et al.* Linking Near and Far Field Hydrodynamic Models for Simulation of Desalination Plant Brine Discharges. 2011, Mar del Plata, Argentina: [s.n.], 2011.
- BOTELHO, D. A. *et al.* Linking Nearfield CFD Models of Buoyant Discharges to Farfield Dispersion Models Linking Nearfield CFD Models of Buoyant Discharges to Farfield Dispersion Models. 2016, Ottawa: [s.n.], 2016.
- CARVALHO, João L B. *Modelagem e Análise do Lançamento de Efluentes Através de Emissários Submarinos*. 2003. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.
- CARVALHO, João L B; ROBERTS, Philip J W; ROLDÃO, João F. Field Observations of Ipanema Beach Outfall. *Journal of Hydraulical Engineering*, v. 128, n. February, p. 151–160, 2002.
- CHIN, David A. Outfall Dilution: The Role of a Far-Field Model. *Journal of Environmental*

Engineering, v. 111, n. 4, p. 473–486, 1985.

CHOI, K. W.; LEE, Joseph H. Distributed Entrainment Sink Approach for Modeling Mixing and Transport in the Intermediate Field. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. 7, p. 804–815, jul. 2007a. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282007%29133%3A7%28804%29>>.

CHOI, K. W.; LEE, Joseph H. Distributed Entrainment Sink Approach for Modeling Mixing and Transport in the Intermediate Field. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. 7, p. 804–815, jul. 2007b. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282007%29133%3A7%28804%29>>.

CHOI, K W; LEE, Joseph H W. A New Approach to Effluent Plume Modelling in the Intermediate Field. 2005, [S.l: s.n.], 2005. p. 4303–4311.

DELTARES. *D-Waq PART. User Manual*. . Delft: [s.n.], 2014.

DELTARES. *Delft3D-FLOW. User Manual*. . Delft: [s.n.], 2011.

DHI. *Mike 3 Estuarine and Coastal Hydraulics and Oceanography*. . [S.l: s.n.], 2001

DONEKER, Robert L. *CORMIX Home Page*. Disponível em: <<http://www.cormix.info/methodology.php>>. Acesso em: 6 out. 2013.

DONEKER, Robert L.; JIRKA, Gerhard H. *CORMIX USER MANUAL. A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters*. . [S.l: s.n.], 2007.

DONEKER, Robert L.; JIRKA, Gerhard H. *Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Submerged Single Port Discharges (CORMIX1)*. . New York: [s.n.], 1990.

FEITOSA, Renato. C. *Acoplamento de modelos de campo próximo e campo afastado com cinética de decaimento bacteriano variável - aplicações em emissários submarinos*. 2007. 190 f. UFRJ, 2007.

FEITOSA, Renato Castiglia *et al.* Coupling bacterial decay and hydrodynamic models for sewage outfall simulation. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, v. 1, n. 2, p. 137–147, 2013. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/23249676.2013.878882>>.

FISCHER, Hugo B *et al.* *Mixing in Inland and Coastal Waters*. New York: Academic Press, Inc., 1979.

FORTIS, Ricardo De Mattos. *Modelagem Computacional da Dispersão da Pluma do Efluente dos Emissários Submarinos do TEBAR - Petrobrás*. 2005. 201 f. Universidade de São Paulo, 2005.

FRACALLOSSI, Karoliny Fantim; KUROSHEMA, Kátia Naomi; HORITA, Cristina Ono. Avaliação da Qualidade da Água de Balneário Camboriú/SC nos Períodos de Baixa e Alta Temporada. 2012, Criciúma: [s.n.], 2012.

FRICK, W. E. Non-empirical closure of the plume equations. *Atmospheric Environment* (1967), v. 18, n. 4, p. 653–662, jan. 1984. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/000469818490252X>>.

FRICK, W E *et al.* *Dilution Models for Effluent Discharges*. . [S.l: s.n.], 2003.

- GERRITSEN, H. *et al.* *Validation Document Delft3D-FLOW: a software system for 3D flow simulations*. . Delft: [s.n.], 2007.
- GREGORIO, Helvio Prevelato. *Modelagem Numérica da Dispersão da Pluma do Emissário Submarino de Santos*. 2009. 125 f. Universidade de São Paulo, 2009.
- HORITA, Cristina Ono; CARVALHO, João L B. Uma alternativa para a qualidade d'água na enseada de Balneário Camboriú, SC: resultados preliminares. 1999, Belo Horizonte: [s.n.], 1999.
- HORITA, Cristina Ono; ROSMAN, Paulo C. C. A Lagrangian Model for Shallow Water Bodies Contaminant Transport. *Journal of Coastal Research*, v. 39, p. 1610–1613, 2004.
- ISHIKAWA, Mayra M. *Aplicação do Modelo CORMIX em Séries Temporais para Análise do Desempenho de Emissários Submarinos*. 2013. 61 f. Universidade Federal do Paraná, 2013.
- ISHIKAWA, Mayra M. *Methodology to classify and visualize time-series simulations using contour graphs*. 2016. 94 f. Universidade Federal do Paraná, 2016.
- JIRKA, Gerhard H. Buoyant Surface Discharges into Water Bodies . II : Jet Integral Model. *Hydraulic Engineering*, n. September, p. 1021–1037, 2007.
- JIRKA, Gerhard H. Integral Model for Turbulent Buoyant Jets in Unbounded Stratified Flows . Part I : Single Round Jet. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 4, p. 1–56, 2004.
- JIRKA, Gerhard H. Integral Model for Turbulent Buoyant Jets in Unbounded Stratified Flows Part 2 : Plane Jet Dynamics Resulting from Multiport Diffuser Jets. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 6, n. 1, p. 43–100, 2006.
- JIRKA, Gerhard H.; AKAR, Paul J. Hydrodynamic Classification of Submerged Multiport-Diffuser Discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 117, n. 9, p. 1113–1128, 1991.
- JIRKA, Gerhard H.; DONEKER, Robert L. Hydrodynamic Classification of Submerged Single-Port Discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 117, n. 9, p. 1095–1112, 1991.
- JIRKA, Gerhard H; DONEKER, Robert L; HINTON, Steven W. *User's Manual for CORMIX: a hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters*. . New York: [s.n.], 1996.
- JONES, Gilbert R *et al.* Buoyant Surface Discharges into Water Bodies . I : Flow Classification and Prediction Methodology. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. September, p. 1010–1021, 2007.
- KIM, Young Do *et al.* Jet Integral – Particle Tracking Hybrid Model for Single Buoyant Jets. *Hydraulic Engineering*, v. 128, n. August, p. 753–761, 2002.
- KIM, Young Do *et al.* Modeling the Mixing of Wastewater Effluent Discharged From Ocean Outfalls Using a Hybrid Model. *Coastal Engineering Journal*, v. 43, n. 4, p. 259–288, dez. 2001.
Disponível em:
<<http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0578563401000372>>.
- KOH, Robert C. Y. Wastewater field thickness and initial dilution. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 109, n. 9, p. 1232–1240, 1983.
- KOWALIK, Z.; MURTY, T. S. *Numerical Modeling of Ocean Dynamics*. 1. ed. Singapore: World Scientific, 1995.
- LAI, Adrian C H; YU, Daeyoung; LEE, Joseph H W. Near and Intermediate Field Mixing of a

Rosette Jet Group. 2007, [S.l: s.n.], 2007. p. 1–6.

LEE, Joseph H W *et al.* Lagrangian modeling and visualization of rosette outfall plumes. 2000, Iowa: [s.n.], 2000. p. 23–27.

LEE, Joseph H W; CHEUNG, Valiant. Generalized Lagrangian Model for Buoyant Jets in Current. *Journal of Environmental Engineering*, v. 116, n. 6, p. 1085–1106, 1990.

LEE, Joseph H W; CHOI, K W. *Distributed Entrainment Sink Approach (DESA) - a New Method for Modelling Mixing and Transport in the Intermediate Field by.* . [S.l: s.n.], 2007.

LEITÃO, P. *et al.* Simulação Integrada da Dispersão de Poluentes no Campo Próximo e no Campo Afastado de um Emissário. 2004, Lisboa: APRH, 2004. p. 1–15.

LESSER, G. R. *et al.* Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Journal of Coastal Engineering*, v. 51, n. 8–9, p. 883–915, out. 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378383904000870>>. Acesso em: 25 set. 2013.

LI, Samuel S.; HODGINS, Donald O. Modelling wastewater effluent mixing and dispersion in a tidal channel. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 37, n. 1, p. 99–111, jan. 2010. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/L09-128>>. Acesso em: 7 mar. 2013.

LI, Sheng; HODGINS, Donald O. A dynamically coupled outfall plume-circulation model for effluent dispersion in Burrard Inlet , British Columbia 1. *Journal of Environmental Engineering Science*, v. 3, p. 433–449, 2004.

MORELISSEN, Robin *et al.* Hydrodynamic modelling of large-scale cooling water outfalls with a dynamically coupled near field - far field modelling system. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 2015.

MORELISSEN, Robin; VAN DER KAAIJ, Theo; BLENINGER, Tobias. Dynamic coupling of near field and far field models for simulating effluent discharges. *Water Science and Technology*, v. 67, n. 10, p. 2210–2220, jan. 2013. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23676390>>. Acesso em: 14 ago. 2013.

MUELLENHOFF, W. P. *et al.* *Initial Mixing Characteristics of Municipal Ocean Discharges: Volume I. Procedures and Applications.* . [S.l: s.n.], 1985.

ORTIZ, Jayme Pinto; ARASAKI, Emilia; MARCELLINO, Edward B. Visão Geral dos Emissários Submarinos no Litoral Paulista. In: LAMPARELLI, CLAUDIA CONDÉ; ORTIZ, JAYME PINTO (Org.). . *Emissários Submarinos: Projeto, Avaliação de Impacto Ambiental e Monitoramento.* São Paulo: Secretaria Meio Ambiente (SP), 2006. p. 25–42.

PEREIRA, Régis S. Métodos numéricos para solução da equação de transporte de massa. 2006, Rio Grande: [s.n.], 2006. p. 19. Disponível em: <<http://www.semengo.furg.br/2006/31.pdf>>.

Relatório de Qualidade das Águas Litorâneas no Estado de São Paulo - Balneabilidade das Praias - 2004: Cap.4 Emissários Submarinos. . São Paulo: [s.n.], 2004.

ROBERTS, Philip J. W. Dilution and Transport Predictions for Ocean Outfalls. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, Xerox, v. 21, n. 8–9, p. 969–979, 1989.

ROBERTS, Philip J. W.; SNYDER, W. H.; BAUMGARTNER, D. J. Ocean Outfalls. I: Submerged

- Wastefield Formation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 115, n. 1, p. 1–25, 1989a.
- ROBERTS, Philip J. W.; SNYDER, W. H.; BAUMGARTNER, D. J. Ocean Outfalls. II: Spatial Evolution of Submerged Wastefield. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 115, n. 1, p. 26–48, 1989b.
- ROBERTS, Philip J. W.; SNYDER, W. H.; BAUMGARTNER, D. J. Ocean Outfalls. III: Effect off Diffuser Design on Submerged Wastefield. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 115, n. 1, p. 49–70, 1989c.
- ROBERTS, Philip J. W.; SNYDER, William H.; BAUMGARTNER, D. J. Ocean Outfalls. II: Spatial Evolution of Submerged Wastefield. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 115, n. 1, p. 26–48, 1989d.
- ROBERTS, Philip J W; VILLEGAS, Beatriz; MORELISSEN, Robin. Coupling a Near Field Outfall Model with a Far Field Hydrodynamic Model. 2015, The Hague: [s.n.], 2015. p. 1–10.
- ROBERTS, Phillip J W. Modeling Mamala Bay Outfall Plumes. II: Far Field. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 6, p. 574–583, 1999a.
- ROBERTS, Phillip J W. Modeling Mamala Bay Outfall Plumes . I : Near Field. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 6, p. 564–573, 1999b.
- RODI, Wolfgang. *Turbulence Models and Their Applications in Hydraulics: A State of the Art Review*. 3rd. ed. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993.
- ROSMAN, Paulo C. C. *Referência Técnica do SisBaHiA*. . Rio de Janeiro: [s.n.], 2013.
- ROSMAN, Paulo C. C. Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental. In: SILVA, RUI C. V. (Org.). . *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5*. [S.l.]: ABRH, 2001. p. 1–161.
- ROSMAN, Paulo Cesar Colonna. Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos. In: SILVA, RUI CARLOS VIEIRA DA (Org.). . *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 3*. 1. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. p. 231–351.
- SANTOS, L. H. *Um Modelo para Trajetória de Partículas em Corpos de Água Rasos - o caso do emissário de Icaraí*. 1995. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995.
- SCHMELING, R. O.; HORITA, Cristina Ono. Modelagem da qualidade da água no complexo lagunar sul de Santa Catarina. 2012, Criciúma: [s.n.], 2012.
- SOCOLOFSKY, Scott A.; BLENINGER, Tobias; DONEKER, Robert L. Jets and Plumes. In: JOSEPH, HARINDRA; FERNANDO, SHERMAL (Org.). . *Handbook of Environmental Fluid Dynamics*. [S.l.]: CRC Press, 2013. p. 329–348.
- SUH, S W. A hybrid near-field/far-field thermal discharge model for coastal areas. *Marine pollution bulletin*, v. 43, n. 7–12, p. 225–33, 2001. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11760188>>.
- TIAN, Xiaodong; ROBERTS, Philip J W; DAVIERO, Gregory J. Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers. II: Unstratified Flowing Water. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 130, n. December, p. 1147–1156, 2004.
- TREVISAN, Alexandre (CASAN/SMA); LAPA, Katt R. (CASAN/GPR); MARCELLINO, Edward B. (SABESP). *Emissários Submarinos para Lançamento de Efluentes Sanitários*. . [S.l.: s.n.]. , 2009
- ULLMANN, Sebastian. *Three-dimensional computation of non-hydrostatic free-surface flows*. 2008. Delft University of Technology, 2008.

UNESCO. *Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater 1980. Unesco Tech. Pap. in Mar. Sci.* Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organizations. , 1981

USEPA. *The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation.* . Fairfax: [s.n.], 2007.

USGS. *ECOM-si homepage.* Disponível em: <<http://woodshole.er.usgs.gov/operations/modeling/ecomsi.html>>. Acesso em: 4 set. 2013.

VAN GASTEL, Paul; MEULENERS, Michael. *Marine Wastewater Discharge Modelling Study.* . [S.l: s.n.], 2011.

ZHANG, X -Y; ADAMS, Eric E. Prediction of Near Field Plume Characteristics Using Far Field Circulation Model. *Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, p. 233–241, 1999.

ZHANG, Xue-Yong. *Ocean Outfall Modeling - interfacing near and far field models with particle tracking method.* 1995. 161 f. Massachusetts Institute of Technology, 1995.

ZHAO, Lin; CHEN, Zhi; LEE, Kenneth. Dynamically Coupled 3D Pollutant Dispersion Model for Assessing Produced Water Discharges in the Canadian Offshore Area. *Environmental Science & Technology*, v. 47, p. 1434–1442, 2013.

ZHAO, Lin; CHEN, Zhi; LEE, Kenneth. Modelling the dispersion of wastewater discharges from offshore outfalls : a review. *Environmental Reviews*, v. 19, p. 107–120, 2011.

APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DOS MODELOS INTEGRAIS DE CAMPO PRÓXIMO

O DKHM (Davis, Kannberg, Hirst) é um modelo tridimensional aplicável a descargas submersas de um orifício ou multiorifícios somente para plumas com flutuabilidade positivo, baseado nos modelos UDKHG e UDKHDEN (MUELLENHOFF *et al.*, 1985). O modelo utiliza o método integral euleriano para resolver as equações do movimento para a trajetória, tamanho, concentração e temperatura da pluma. Por ser um método euleriano, a distância é uma variável independente enquanto que nos métodos lagrangeanos a variável independente é o tempo (FRICK, *et al.*, 2003).

O modelo UM3 corresponde ao acrônimo *Updated Merge* (UM) em três dimensões. Assim como o modelo DKHM, o UM3 simula descargas submersas de um ou mais orifícios, mas em um referencial lagrangeano considerando a hipótese da área projetada de arraste (FRICK, 1984). Esta hipótese quantifica o arraste forçado (induzido pelo escoamento transversal), a taxa com que a massa é incorporada no jato na presença de correntes. Este modelo considera que o jato está no estado estacionário, e a formulação Lagrangeana implica que partículas sucessivas seguem uma mesma trajetória. Os resultados deste modelo consistem nas características do jato ao longo da sua trajetória, tal como a diluição, largura e a altura do eixo central.

O modelo Jetlag (*Lagrangean Jet model*) faz parte do sistema VisJet e simula jatos flutuantes circulares com inclinação arbitrária em ambientes dinâmicos, analisando trajetórias tridimensionais. O modelo não resolve as equações diferenciais governantes do movimento e do transporte de massa, como um modelo Euleriano, mas simula os processos físicos chave expressos pelas equações governantes. A trajetória do jato (uma das incógnitas) é vista como uma série de “elementos de pluma” independentes que aumentam sua massa como resultado do arraste induzido pelo cisalhamento (causado pela descarga dos jatos) e do arraste induzido pelos vórtices (causado pelo escoamento transversal), enquanto sobem devido às acelerações verticais (flutuabilidade) (LEE *et al.*, 2000). Utiliza também a hipótese da área projetada de arraste para a determinação do arraste induzido pelos vórtices, como no modelo UM3.

O modelo CORJET (*Cornell Buoyant Jet Integral Model*) é um modelo de pós-processamento ligado ao sistema CORMIX (*Cornell Mixing Zone Expert System*), mas que pode ser utilizado independentemente para análises detalhadas do comportamento de jatos

flutuantes. O CORMIX é composto por três subsistemas integrados: CORMIX1, CORMIX2 e CORMIX3, utilizados respectivamente para descargas submersas de um único bocal, descargas submersas de multiorifícios e descargas superficiais de jatos flutuantes.

O CORJET calcula a trajetória e diluição das descargas características de um único jato (JIRKA, 2004) ou de uma série de jatos unidos provenientes de um difusor multiorifícios com direção arbitrária (JIRKA, 2006), apresentando flutuabilidade positiva, negativa ou neutra. As condições do ambiente podem ser altamente não uniformes em relação ao campo de velocidades (direção e intensidade) e ao perfil vertical de densidade. Em geral, o CORJET pode ser utilizado como um aprimoramento dos resultados obtidos pelo CORMIX1 ou 2 de modo a investigar detalhes locais que foram simplificados na representação do CORMIX.

O MOHIDJET é um modelo integral que simula a diluição inicial associada a jatos de emissários submarinos, e gera condições iniciais para o módulo de traçadores lagrangeanos do modelo MOHID. A aproximação Lagrangeana utilizada neste modelo é similar à usada no modelo JETLAG, onde se simula a trajetória e a variação de volume de um traçador com geometria cilíndrica em um ambiente estacionário. Entretanto, a parametrização do arraste está baseada no CORJET.

APÊNDICE B - DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE CAMPO AFASTADO

O POM é um modelo de mesoescala, simulando processos envolvidos em uma escala espacial de 1-100 km e em uma escala temporal de 30 dias. É um modelo tridimensional que resolve as equações primitivas do movimento juntamente com equações para a temperatura e salinidade em uma malha curvilínea com coordenadas sigma na vertical. O modelo utiliza a aproximação hidrostática, e os processos de mistura vertical são parametrizados pela incorporação de um modelo de fechamento da turbulência de segunda ordem (BLUMBERG; MELLOR, 1987).

O modelo ECOM-si (*Estuarine, Coastal and Ocean Model (semi-implicit)*) está baseado no modelo POM, compartilhando a mesma estrutura do grid numérico e técnicas numéricas na sua formulação. Porém, ele incorpora um esquema implícito para resolver as ondas de gravidade, de forma que a necessidade em separar os passos de tempo do modo barotrópico e baroclínico é eliminado (USGS, 2013).

O modelo Mike 3, desenvolvido pelo *Danish Hydraulic Institute* (DHI) faz parte de um sistema composto pelos seguintes módulos principais: hidrodinâmico, de turbulência e de transporte. Além destes, módulos de aplicação (transporte de sedimentos coesivos, transporte de partículas, qualidade de água e eutrofização) foram implementados dentro do mesmo sistema. O modelo hidrodinâmico baseia-se na solução numérica das equações tridimensionais de Navier-Stokes sujeitas à aproximação de Boussinesq e aproximação hidrostática. Assim, o modelo consiste nas equações de continuidade, quantidade de movimento, temperatura, salinidade e densidade, tendo um esquema de fechamento pela turbulência. As equações do modelo hidrodinâmico são discretizadas por um esquema implícito de diferenças finitas e resolvidas de modo não iterativo pelo uso da técnica ADI (*Alternating Directions Implicit*), enquanto o transporte de escalares é resolvido utilizando um esquema explícito de diferenças finitas (DHI, 2001).

O SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) é um sistema de modelos computacionais que têm sido continuamente melhorado/implementado no COPPE/UFRJ desde 1987. Fazem parte deste sistema os seguintes modelos: hidrodinâmico, transporte euleriano, qualidade de água e eutrofização, transporte de sedimentos e evolução morfológica do fundo, transporte lagrangeano determinístico e probabilístico, campo próximo para emissários e fontes pontuais, geração de ondas, propagação de ondas, análise e previsão de

marés. O modelo hidrodinâmico pode ser utilizado em 2 ou 3 dimensões, sendo bidimensional na horizontal, 2DH, ou tridimensional (3D) barotrópico. Neste caso, resolve as equações completas de Navier-Stokes com a aproximação da pressão hidrostática e a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes às aquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (*LES – Large Eddy Simulation*). Estas equações são discretizadas espacialmente por elementos finitos quadrangulares biquadráticos na horizontal e verticalmente pelo método de diferenças finitas com coordenadas sigma. A discretização temporal é feita por meio de um esquema implícito de diferenças finitas, com erro de truncamento de segunda ordem (ROSMAN, PAULO C. C., 2013).

O Delft3D é um pacote de vários módulos agrupados sob uma mesma interface, sendo possível a interação entre eles. A composição deste pacote incluem os seguintes modelos: hidrodinâmico (Delft3D-FLOW), propagação de ondas curtas (Delft3D-WAVE), qualidade de água no campo afastado (Delft3D-WAQ), qualidade de água no campo intermediário e transporte de partículas (Delft3D-Part), ecológico (Delft3D-ECO), e transporte de sedimentos coesivos e não coesivos (Delft3D-SED).

O Delft3D-FLOW inclui movimentos gerados por maré, força de Coriolis, escoamentos gerados por gradientes de densidade, vento e pressão atmosférica variável no tempo e no espaço, modelos avançados de turbulência considerados para o cálculo da viscosidade turbulenta vertical e difusividade baseada no conceito de viscosidade turbulenta, fontes e retiradas variáveis no tempo, simulação de descargas térmicas, efluentes e retirada de água de resfriamento em qualquer local ou profundidade, derivadores e simulação de enchente e secamento de planícies de inundação (DELTARES, 2011).

O Delft3D-FLOW resolve as equações não permanentes e não lineares de águas rasas em três dimensões, considerando a aproximação hidrostática. As equações são formuladas em coordenadas ortogonais curvilíneas ou em coordenadas esféricas no globo terrestre e, na vertical pode-se usar a coordenada geopotencial z ou a coordenada sigma. Neste caso, está implementado no modelo uma correção anti-deformação para eliminar difusão vertical artificial e escoamentos artificiais devido às grades sigma (BLENINGER, 2006).

APÊNDICE C - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO CORJET

As equações integrais de jato são obtidas em um sistema de coordenadas Euleriano ao longo da linha de centro do jato, havendo uma sobreposição dos sistemas de coordenadas local (s, r) e o sistema de coordenada Cartesiano (x, y, z) , conforme se observa na Figura 123. A coordenada s é tangente à linha de centro local do jato, a coordenada r é radial a partir de s , a coordenada x aponta para a direção da corrente ambiente, $\vec{u}_a = (u_a(z), 0, 0)$, e a coordenada z aponta na direção oposta ao vetor gravidade, $\vec{f}_g = (0, 0, -g)$, sendo a origem do sistema Cartesiano na saída do jato.

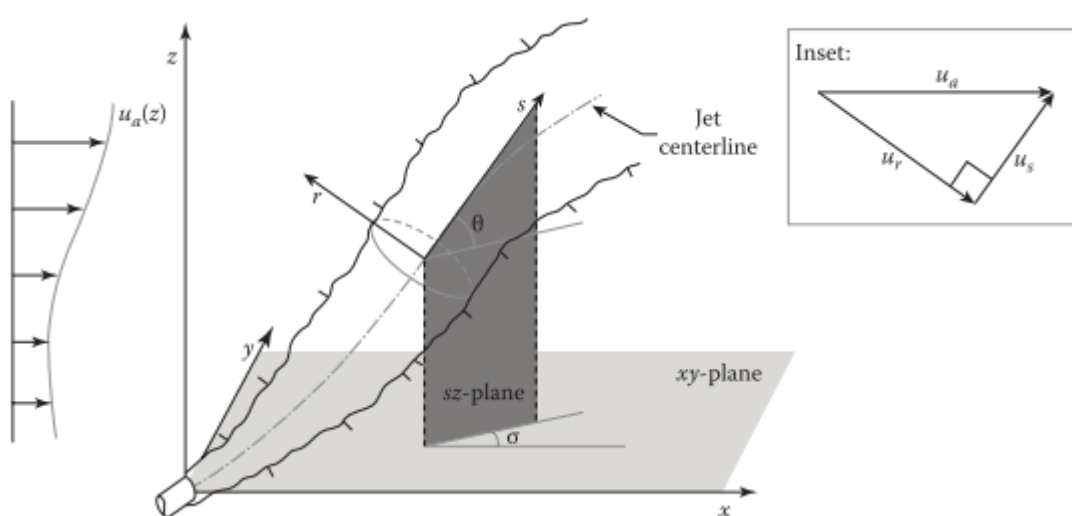


Figura 123 - Esquema de representação dos sistemas de coordenadas local (s, r) e Cartesiano (x, y, z) para o modelo integral de jato flutuante.

Fonte: Socolofsky et al. (2013)

Ainda na Figura 123, podem-se observar os ângulos σ (entre os eixos s e x) e θ (entre os eixos s e z) que permitem a transformação entre os dois sistemas de coordenadas. Desta forma, um vetor unitário na direção s na origem do sistema de coordenadas tem como coordenadas Cartesianas:

$$e_s = (\cos \sigma \cos \theta, \sin \sigma \sin \theta, \sin \theta) \quad (38)$$

O componente do vetor velocidade transversal a s é determinado por:

$$u_t = u_a \sqrt{1 - \cos^2 \sigma \cos^2 \theta} \quad (39)$$

Nas equações que se seguem são utilizadas transformações geométricas similares.

Equações de fluxo

As equações de fluxo para o modelo integral de jato são apresentadas abaixo, integrando-se todos os termos das equações governantes turbulentas de Reynolds (equações (25) a (27)) ao longo da seção transversal plana por unidade de largura. Os limites da integração são obtidos de acordo com a teoria da camada limite.

$$q = \int_{-b_j}^{b_j} u \, dr = \sqrt{\pi} b \left(u_c + \sqrt{2} u_a \cos \theta \cos \sigma \right), \quad (40)$$

$$m = \int_{-b_j}^{b_j} u^2 \, dr = \sqrt{\frac{\pi}{2}} b \left(u_c + \sqrt{2} u_a \cos \theta \cos \sigma \right)^2, \quad (41)$$

$$j = \int_{-b_j}^{b_j} u g' \, dr = \sqrt{\pi} b \left(u_c \frac{\lambda_s}{\sqrt{1 + \lambda_s^2}} + \lambda_s u_a \cos \theta \cos \sigma \right) g'_c, \quad (42)$$

$$q_{Xi} = 2\pi \int_{-b_j}^{b_j} (X_i - X_{ia}) \, dr = \sqrt{\pi} b \left(u_c \frac{\lambda_s}{\sqrt{1 + \lambda_s^2}} + \lambda_s u_a \cos \theta \cos \sigma \right) X_{ic}, \quad (43)$$

$$q_c = \int_{-b_j}^{b_j} u c \, dr = \sqrt{\pi} b \left(u_c \frac{\lambda_s}{\sqrt{1 + \lambda_s^2}} + \lambda_s u_a \cos \theta \cos \sigma \right) c_c. \quad (44)$$

onde q é o fluxo volumétrico total, m é o fluxo de quantidade de movimento axial, j é fluxo de flutuabilidade, q_{Xi} é o fluxo do parâmetro de estado em excesso, e q_c é o fluxo de massa do traçador.

Equações do modelo de arraste

A Figura 124 apresenta um esquema de um volume de controle diferencial ao longo da trajetória do jato para o qual são derivadas as equações do modelo: continuidade, componentes da quantidade de movimento nas direções globais x, y e z , parâmetros de estado e massa (JIRKA, 2006).

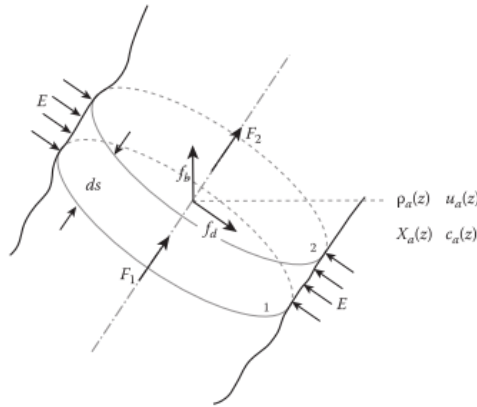


Figura 124 - Representação esquemática de um volume de controle de um jato flutuante usado para derivar as equações governantes de conservação de um modelo de jato integral.

Fonte: Socolofsky et al. (2013).

$$\frac{dq}{ds} = e \quad (45)$$

$$\frac{d}{ds}(m \cos \theta \cos \sigma) = eu_a + f_d \sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma} \quad (46)$$

$$\frac{d}{ds}(m \cos \theta \sin \sigma) = -f_d \frac{\cos^2 \theta \sin \sigma \cos \sigma}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma}} \quad (47)$$

$$\frac{d}{ds}(m \sin \theta) = \sqrt{\pi} \lambda_s b g'_c - f_d \frac{\sin \theta \cos \theta \cos \sigma}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma}} \quad (48)$$

$$\frac{dq_{Xi}}{ds} = -Q \frac{dX_{ia}}{dz} \sin \theta \quad (49)$$

$$\frac{dq_c}{ds} = 0 \quad (50)$$

onde e e f_d são coeficientes de fechamento da turbulência, sendo respectivamente a taxa específica de arraste e a força de arraste devido ao escoamento transversal. Seu equacionamento é dado por (JIRKA, 2006).

$$e = 2u_c \left(\alpha_{1s} + \alpha_{2s} \frac{\sin \theta}{F_l^2} + \alpha_{3s} \frac{u_a \cos \theta \cos \sigma}{u_c + u_a} \right) + u_a \sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma} \left(\alpha_{4s} + \alpha_{5s} \left| \frac{\tan \theta_{eq}}{\tan \theta} \right| \right) |\cos \theta \cos \sigma| \quad (51)$$

$$f_d = c_{Ds} u_a^2 (1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma) |\sin \gamma| \quad (52)$$

onde os coeficientes α_{1s} , α_{2s} , α_{3s} , α_{4s} , λ e c_{Ds} são respectivamente para jatos, plumas, *wake* e efeito de bloqueio do jato plano relativo ao escoamento que se aproxima. (JIRKA, 2006), propôs o seguinte conjunto de valores para estes coeficientes:

$$\alpha_{1s} = 0.0625, \alpha_{2s} = 0.815, \alpha_{3s} = 0.031, \alpha_{4s} = 0.5, \lambda = 1.30, c_{Ds} = 15.0 \quad (53)$$

Para fechar o sistema de equações, a trajetória é obtida a partir das equações (28) a (30). E a densidade necessária para determinar a gravidade reduzida é obtida a partir da equação de estado.

APÊNDICE D – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO DELFT3D-FLOW

O Delft3D-FLOW utiliza coordenadas ortogonais curvilíneas na direção horizontal, podendo ser coordenadas cartesianas (ξ, η) ou coordenadas esféricas (λ, ϕ) . E na direção vertical apresenta dois sistemas diferentes: o sistema de coordenadas σ e o sistema de coordenadas cartesianas z .

Equação da continuidade

A equação da continuidade promediada na vertical é dada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left[(d + \zeta) U \sqrt{G_{\eta\eta}} \right]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left[(d + \zeta) V \sqrt{G_{\xi\xi}} \right]}{\partial \eta} = Q \quad (54)$$

onde ζ = elevação da superfície livre acima de um plano de referência ($z = 0$) (m); d = profundidade sob o plano de referência (m); U e V = velocidades promediadas na vertical na direção ξ e η , respectivamente (m/s); $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ e $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ = coeficientes usados para transformar coordenadas curvilíneas em retangulares (m); Q = contribuições por unidade de área devido a entrada ou saída de água, evaporação e precipitação (m/s).

Equações horizontais da quantidade de movimento

Direção ξ :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \\ & + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f_v = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \\ & + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (55)$$

Direção η :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \\ & - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + f_u = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \\ & + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (56)$$

onde u , v = velocidade do escoamento na direção ζ e η , respectivamente (m/s); ω = velocidade do escoamento na vertical no sistema de coordenadas σ (m/s); f = parâmetro de Coriolis (frequência inercial) (s^{-1}); ν_v = coeficiente de viscosidade turbulenta vertical (m^2/s); M_ξ e M_η representam contribuições devido a fontes ou sumidouros externos de quantidade de movimento (m/s^2). As forças F_ξ e F_η nas equações de quantidade de movimento representam as tensões de Reynolds na horizontal fora do equilíbrio (m/s^2). Os termos P_ξ e P_η representam os gradientes de pressão hidrostática ($kg/(m^2.s^2)$).

Aproximação hidrostática

Considerando-se a aproximação de águas rasas, a equação vertical de quantidade de movimento reduz-se à equação da pressão hidrostática em coordenadas σ :

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (57)$$

onde P = pressão (Pa); ρ = densidade local do fluido (incluindo salinidade, temperatura e sedimento) (kg/m^3); g = aceleração da gravidade (m/s^2).

Os gradientes de pressão, P_ξ e P_η , são formulados considerando a água com densidade constante e também a densidade não-uniforme, onde neste caso a densidade relaciona-se a valores de temperatura e salinidade por equações de estado.

Densidade Constante:

$$\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta}, \quad (58)$$

$$\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi}. \quad (59)$$

Densidade Não-uniforme:

$$\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + g \frac{d + \zeta}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} \int_\sigma^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \xi} + \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) d\sigma', \quad (60)$$

$$\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + g \frac{d + \zeta}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} \int_\sigma^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \eta} + \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) d\sigma'. \quad (61)$$

Força de Coriolis

O parâmetro de Coriolis f , é função da latitude e da velocidade angular de rotação da Terra, Ω : $f = 2\Omega \sin \phi$. Em grades curvilíneas deve-se especificar um parâmetro de Coriolis variável no espaço, utilizando uma projeção adequada.

Tensões de Reynolds

As tensões horizontais de Reynolds, F_ξ e F_η , são determinadas usando o conceito de viscosidade turbulenta. Para simulações de grande escala (quando as tensões de cisalhamento ao longo das fronteiras fechadas podem ser desconsideradas) as forças F_ξ e F_η podem ser escritas de forma simplificada, onde os gradientes são ao longo dos planos σ .

$$F_\xi = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) \quad (62)$$

$$F_\eta = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) \quad (63)$$

onde ν_H = coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal, e neste equacionamento foi considerada como constante.

Equação de transporte advectivo-difusivo

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (d + \zeta) c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial [\sqrt{G_{\eta\eta}} (d + \zeta) u c]}{\partial \xi} + \frac{\partial [\sqrt{G_{\xi\xi}} (d + \zeta) v c]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} = \\ & \frac{d + \zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} + \\ & + \frac{1}{d + \zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) - \lambda_d (d + \zeta) c + S \end{aligned} \quad (64)$$

onde c = concentração da substância (kg/m^3); D_H, D_V = coeficientes de difusão horizontal e vertical (m^2/s); λ_d = coeficiente de decaimento de primeira ordem (s^{-1}).

Modelo de fechamento da turbulência

No Delft3D-FLOW estão implementados vários modelos de fechamento da turbulência, todos eles baseados no conceito da viscosidade turbulenta. Esta se apresenta da seguinte forma nos modelos:

$$\nu_V = c'_\mu L \sqrt{k} \quad (65)$$

onde c'_μ = constante determinada pela calibração; L = comprimento de mistura; e k = energia cinética turbulenta.

Os quatro modelos implementados são: (1) coeficiente constante, (2) modelo algébrico, (3) modelo $k - L$, e (4) modelo $k - \varepsilon$. O primeiro é um valor constante especificado

pelo usuário e fornece um perfil vertical parabólico de velocidades (fluxo laminar). Os outros três modelos são baseados no conceito de viscosidade turbulenta de Kolmogorov e Prandtl, e geram modelos de fechamento de zero, primeira e segunda ordem para a energia cinética turbulenta (k) e para o comprimento de mistura (L). Esses modelos consideram o efeito que um gradiente vertical de densidade tem no amortecimento da quantidade de mistura turbulenta vertical (DELTARES, 2011).

Condições de Contorno

Para resolver o sistema de equações é necessário impor as seguintes condições de contorno.

Condições de contorno de superfície livre e fundo

No sistema de coordenadas σ , a superfície livre ($\sigma = 0$) e o fundo ($\sigma = -1$) correspondem a planos σ impermeáveis. Desta forma, as velocidades verticais ω relativas aos planos σ , nestas fronteiras são simplesmente:

$$\omega|_{\sigma=-1} = 0 \quad e \quad \omega|_{\sigma=0} = 0 \quad (66)$$

O atrito no fundo, para as equações de quantidade de movimento, é representado como:

$$\left. \frac{\nu_V}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=-1} = \frac{1}{\rho_0} \tau_{b\xi} \quad (67)$$

$$\left. \frac{\nu_V}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=-1} = \frac{1}{\rho_0} \tau_{b\eta} \quad (68)$$

onde $\tau_{b\xi}$ e $\tau_{b\eta}$ são componentes da tensão de atrito no fundo na direção ξ e η , respectivamente (N/m^2).

E as condições de contorno na superfície livre são representadas por:

$$\left. \frac{\nu_V}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=0} = \frac{1}{\rho_0} \left| \vec{\tau}_s \right| \cos(\theta) \quad (69)$$

$$\left. \frac{\nu_V}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=0} = \frac{1}{\rho_0} \left| \vec{\tau}_s \right| \sin(\theta) \quad (70)$$

onde θ = ângulo entre o vetor tensão gerado pelo vento e a direção local da linha de grade η . A magnitude da tensão de cisalhamento devido ao vento é determinada pela expressão quadrática, amplamente utilizada:

$$|\vec{\tau}_s| = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad (71)$$

onde ρ_a = densidade do ar (kg/m^3); U_{10} = velocidade do vento a 10 metros acima da superfície livre (m/s); C_d = coeficiente de arraste do vento.

Condições de contorno laterais

Ao longo das fronteiras fechadas, a componente normal da velocidade ao contorno fechado é zero. Nas fronteiras abertas, um dos tipos de condição de contorno deve ser especificada: nível d'água, velocidade (na direção normal ao contorno), vazão ou contorno levemente refletivo (Riemann). Em simulações tridimensionais, o usuário deve prescrever o uso de um perfil uniforme ou logarítmico de velocidade nos contornos de entrada de fluxo.

Para as condições de contorno para a equação de transporte, assume-se que o transporte horizontal de substâncias dissolvidas é dominado pela advecção.

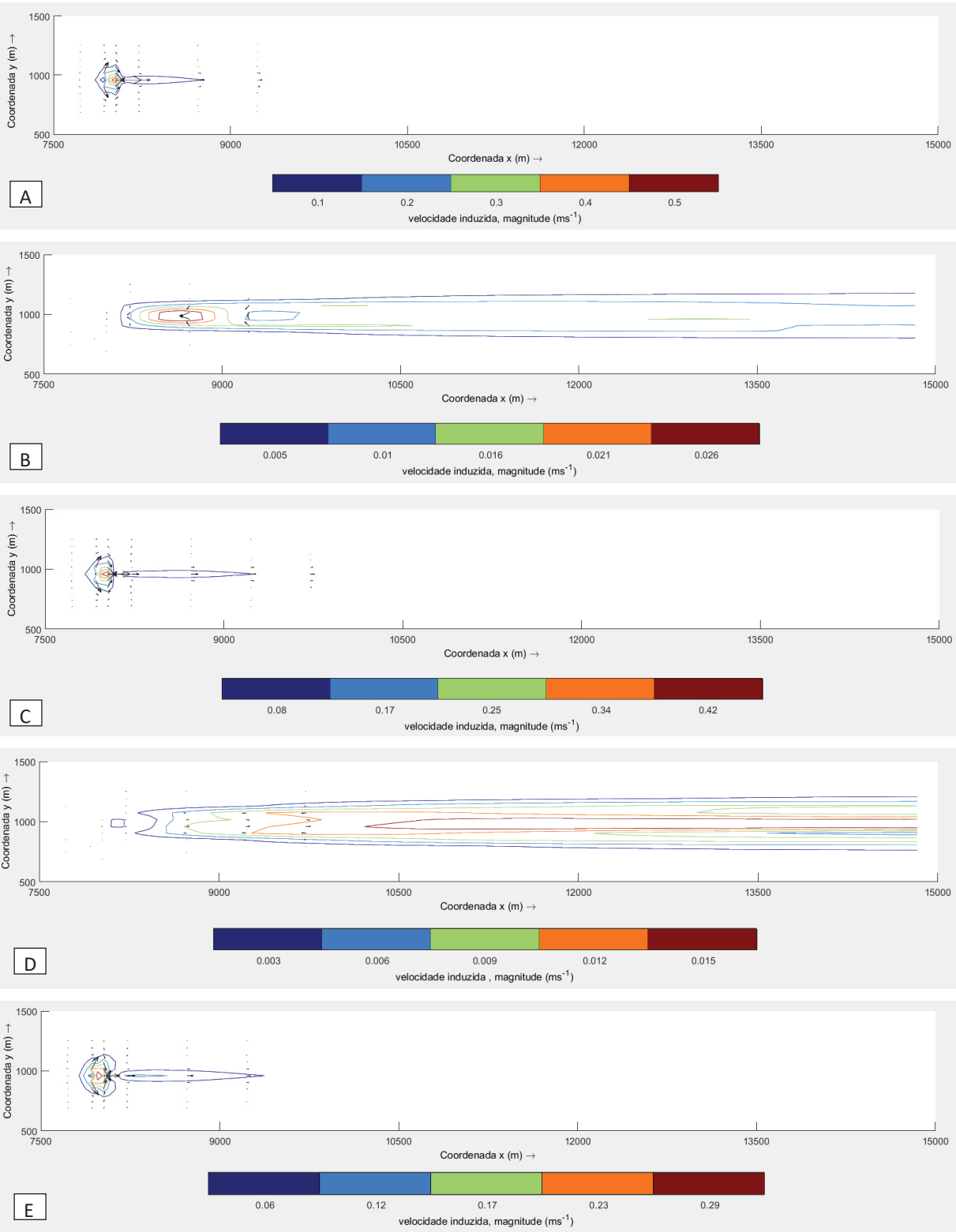
APÊNDICE E – EXEMPLO DO ARQUIVO DE ENTRADA CORINP.DAT

```

*
*   Base path to place cortime.linkinp file
*
C:\Users\Cristina\Documents\doutorado\VnVTest2BW\cormix\
*
*   Number of coupled discharges
*
1      ! no_dis
*
*   Position diffusor in flow computation
*
124    ! Mdiff
20     ! Ndiff
*
*   Position where to get ambient conditions
*
120    ! Mambient
20     ! Nambient
*
*   Position where to get ambient conditions
*
0      ! Mintake
0      ! Nintake
0      ! Kintake
*
*   Discharge
*
3.9    ! M3/s
*
*   Temp and salinity (absolute values if Mintake = 0, otherwise dT,dS)
*
20.    ! T0
0.001  ! S0 (Compute Rho0 from temp and salinity)
*
*   General cormix parameters
*
0.46   ! D0   (Diameter)
1.0    ! H0   (Height above the bed for Corjet; not used in Cortime input)
90.0   ! Theta0 (Corjet, not used for cortim)
90.0   ! Sigma0 (horizontal; 0 pointing to east, 90 pointing to north)
*
*   Cormix Base case (name of the cmx file without the extension cmx)
*
C:\Users\Cristina\Documents\doutorado\VnVTest2BW\delft_teste11\outfall\Sample1

```

APÊNDICE F – VELOCIDADES INDUZIDAS POR CAMADAS PARA CADA CASO TESTE



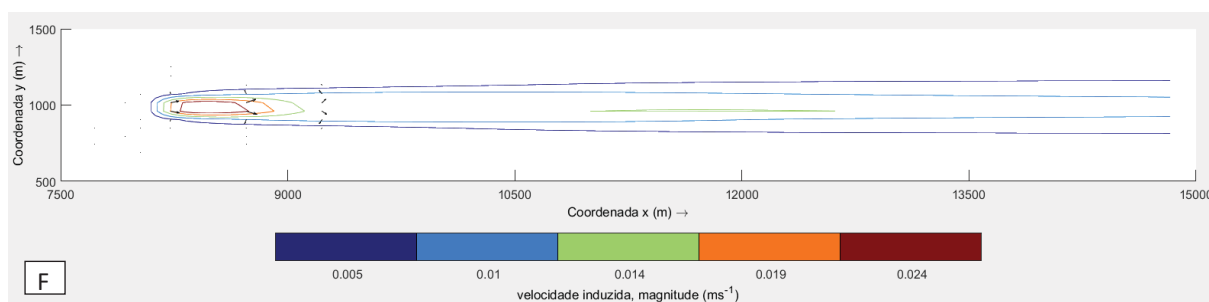


Figura 125 – Velocidade induzida obtida para o caso teste 1 (A) com o acoplamento dinâmico na camada da superfície do canal (L1), (B) com o acoplamento passivo na camada da superfície do canal (L1), (C) com o acoplamento dinâmico na camada do meio do canal (L5), (D) com o acoplamento passivo na camada do meio do canal (L5), (E) com o acoplamento dinâmico na camada de fundo do canal (L10), (F) com o acoplamento passivo na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas representam a magnitude da velocidade e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade. Escala do vetor: $1 \text{ ms}^{-1} = 500 \text{ m}$ (acoplamento dinâmico), $1 \text{ ms}^{-1} = 3000 \text{ m}$ (acoplamento passivo).

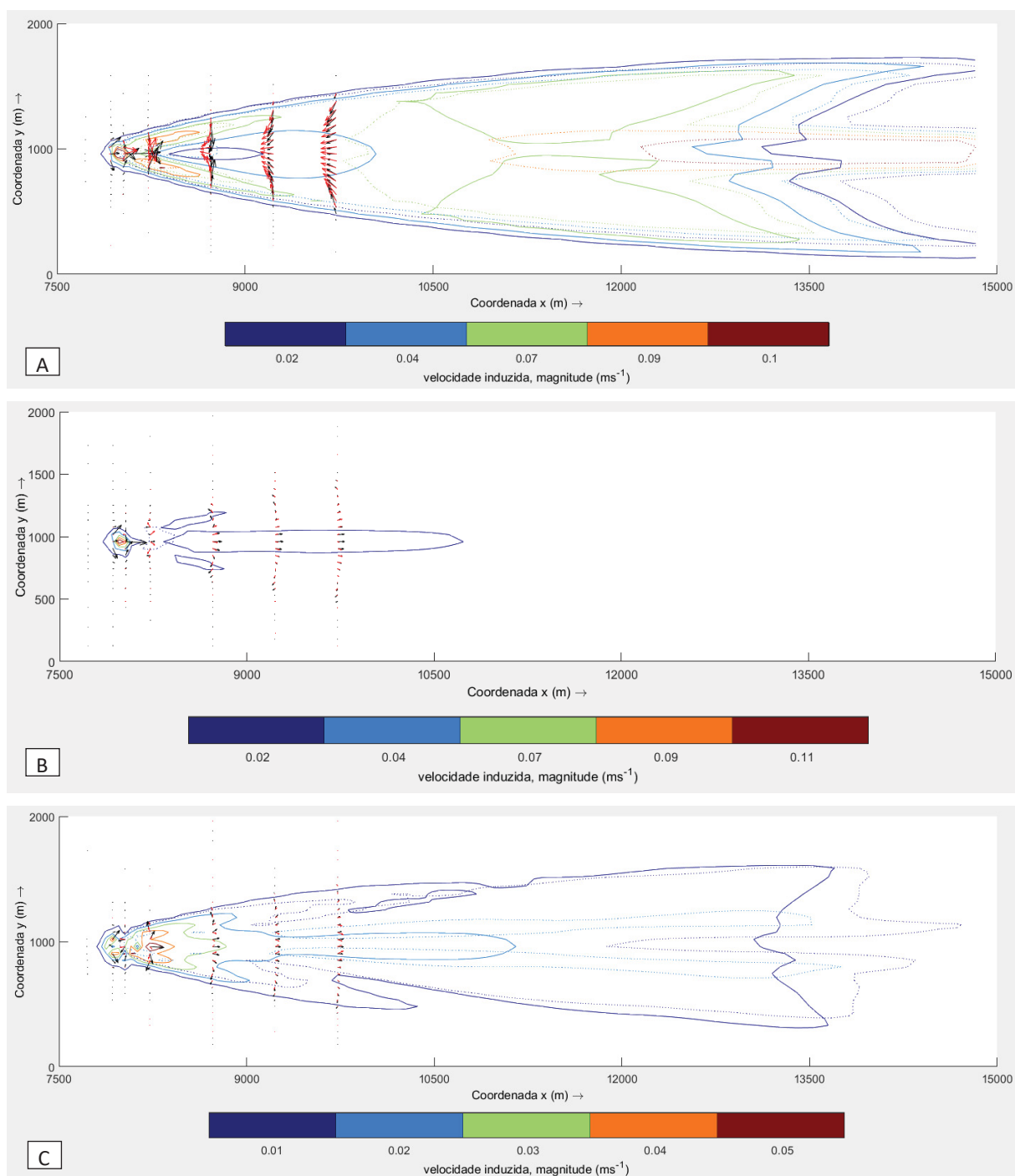


Figura 126 – Velocidade induzida obtida para o caso teste 2 (A) na superfície do canal (L1), (B) na camada do meio do canal (L5), (C) na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas representam a magnitude da velocidade, (—) acoplamento dinâmico e (:) acoplamento passivo, e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade, (←) acoplamento dinâmico, (↖) acoplamento passivo. Escala dos vetores: $1 \text{ ms}^{-1} = 2000 \text{ m}$.

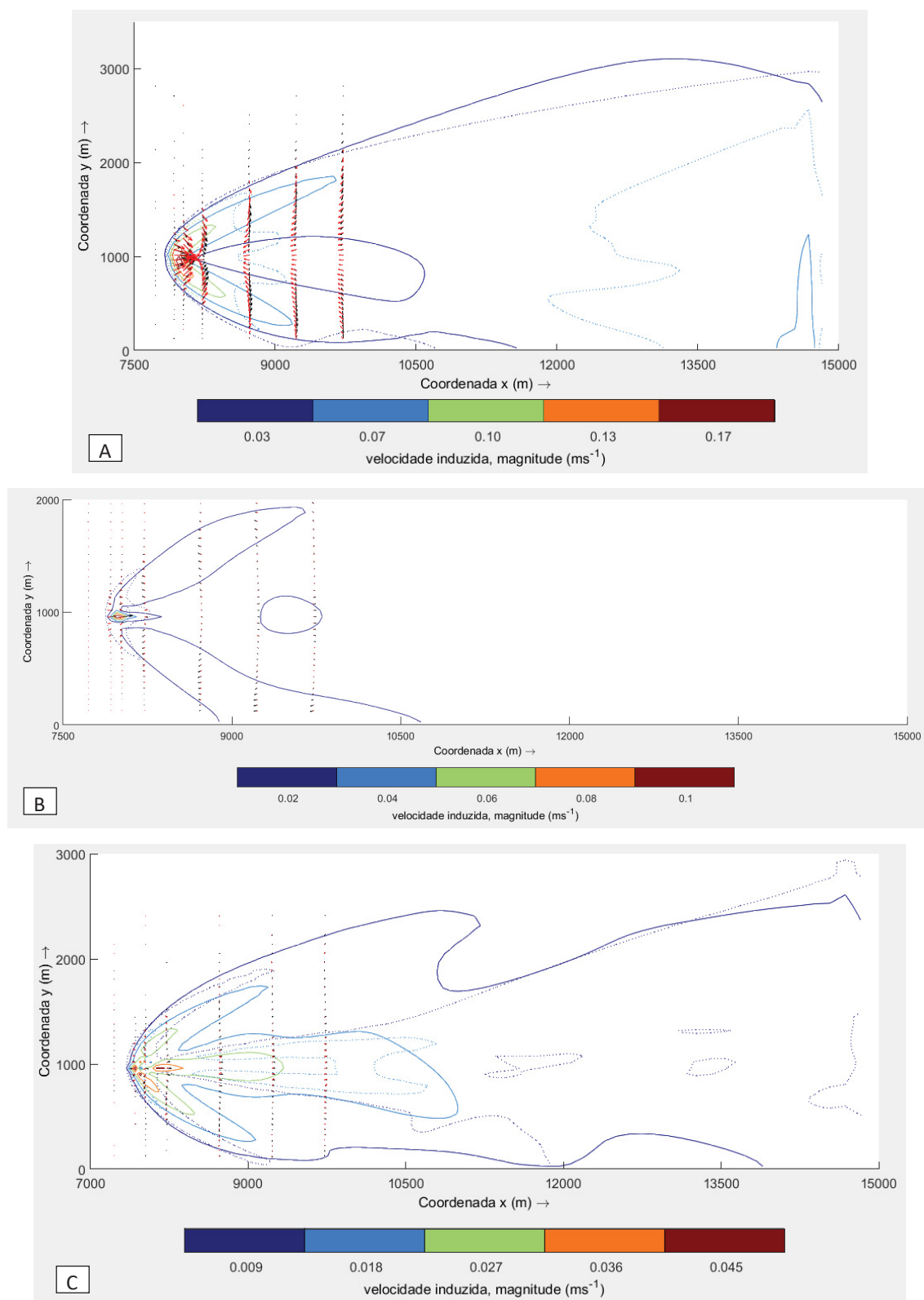


Figura 127 – Velocidade induzida obtida para o caso teste 3 (A) na superfície do canal (L1), (B) na camada do meio do canal (L5), (C) na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas representam a magnitude da velocidade, (—) acoplamento dinâmico e (:) acoplamento passivo, e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade, (←) acoplamento dinâmico, (↖) acoplamento passivo. Escala dos vetores: $1 \text{ ms}^{-1} = 1000 \text{ m}$.

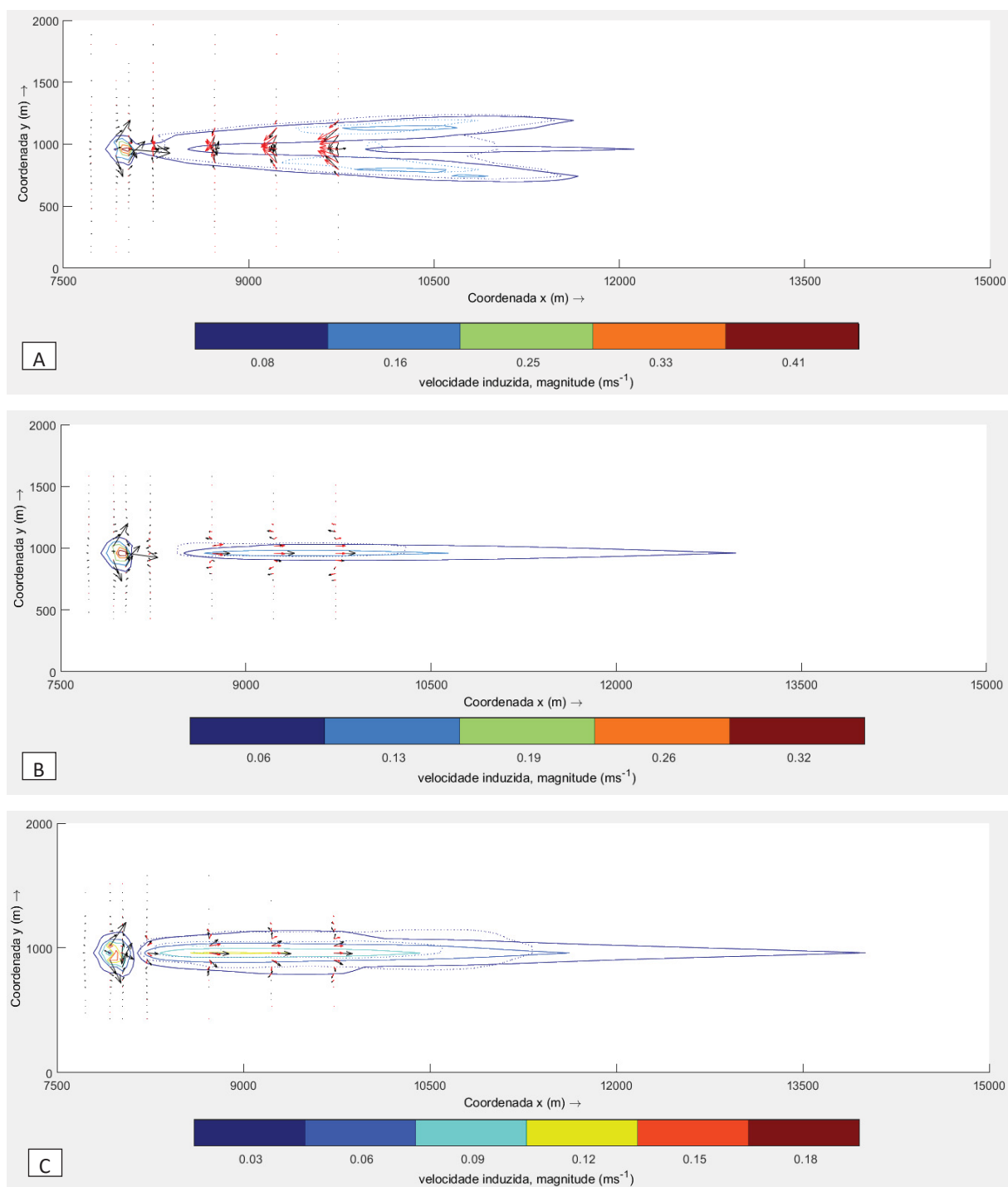


Figura 128 - Velocidade induzida obtida para o caso teste 4 (A) na superfície do canal (L1), (B) na camada do meio do canal (L5), (C) na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas representam a magnitude da velocidade, (—) acoplamento dinâmico e (:) acoplamento passivo, e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade, (←) acoplamento dinâmico, (↖) acoplamento passivo. Escala dos vetores: $1 \text{ ms}^{-1} = 1000 \text{ m}$.

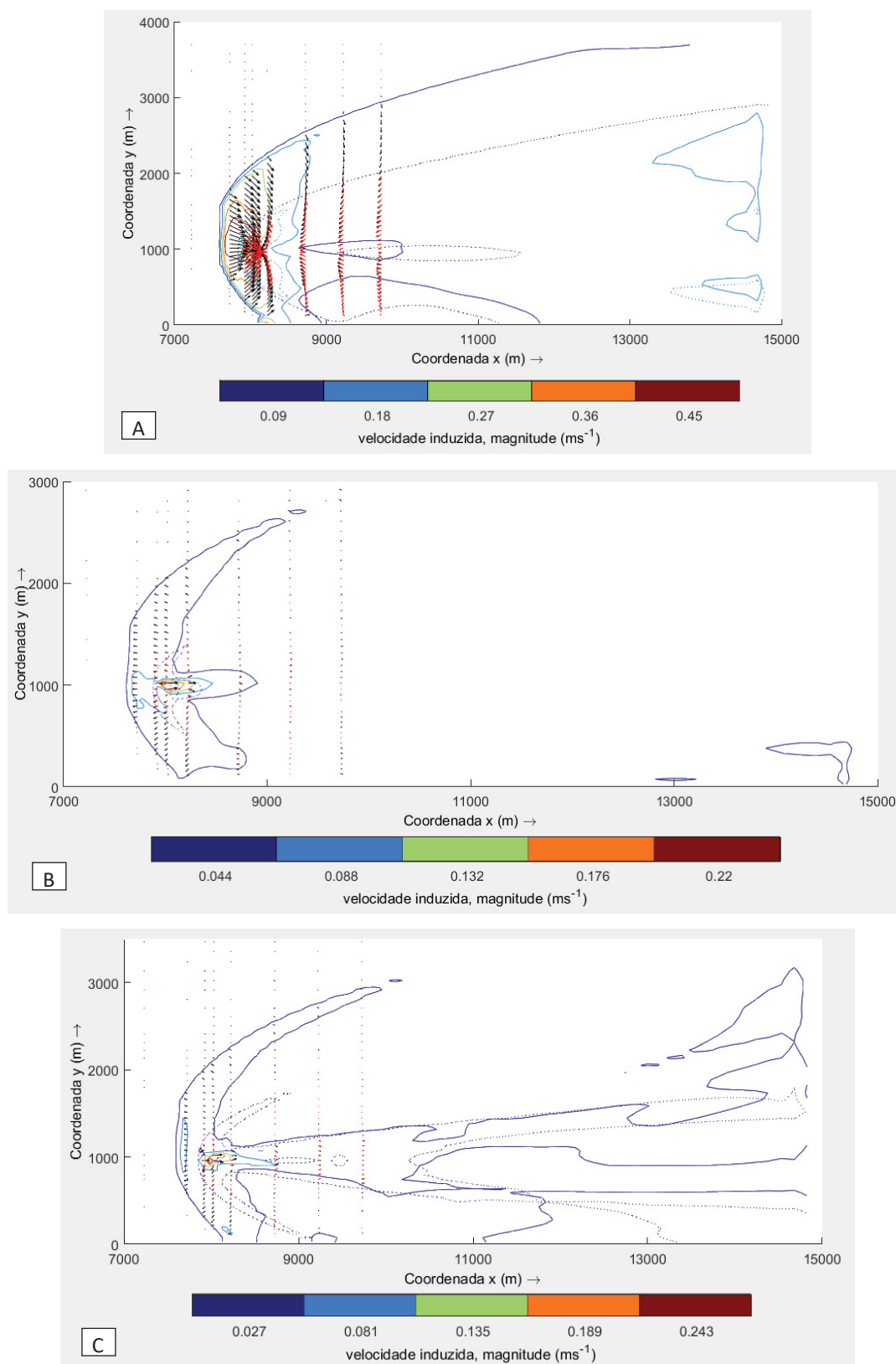


Figura 129 - Velocidade induzida obtida para o caso teste 5 (A) na superfície do canal (L1), (B) na camada do meio do canal (L5), (C) na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas representam a magnitude da velocidade, (—) acoplamento dinâmico e (:) acoplamento passivo, e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade, (←) acoplamento dinâmico, (↖) acoplamento passivo. Escala dos vetores: $1 \text{ ms}^{-1} = 500 \text{ m}$.

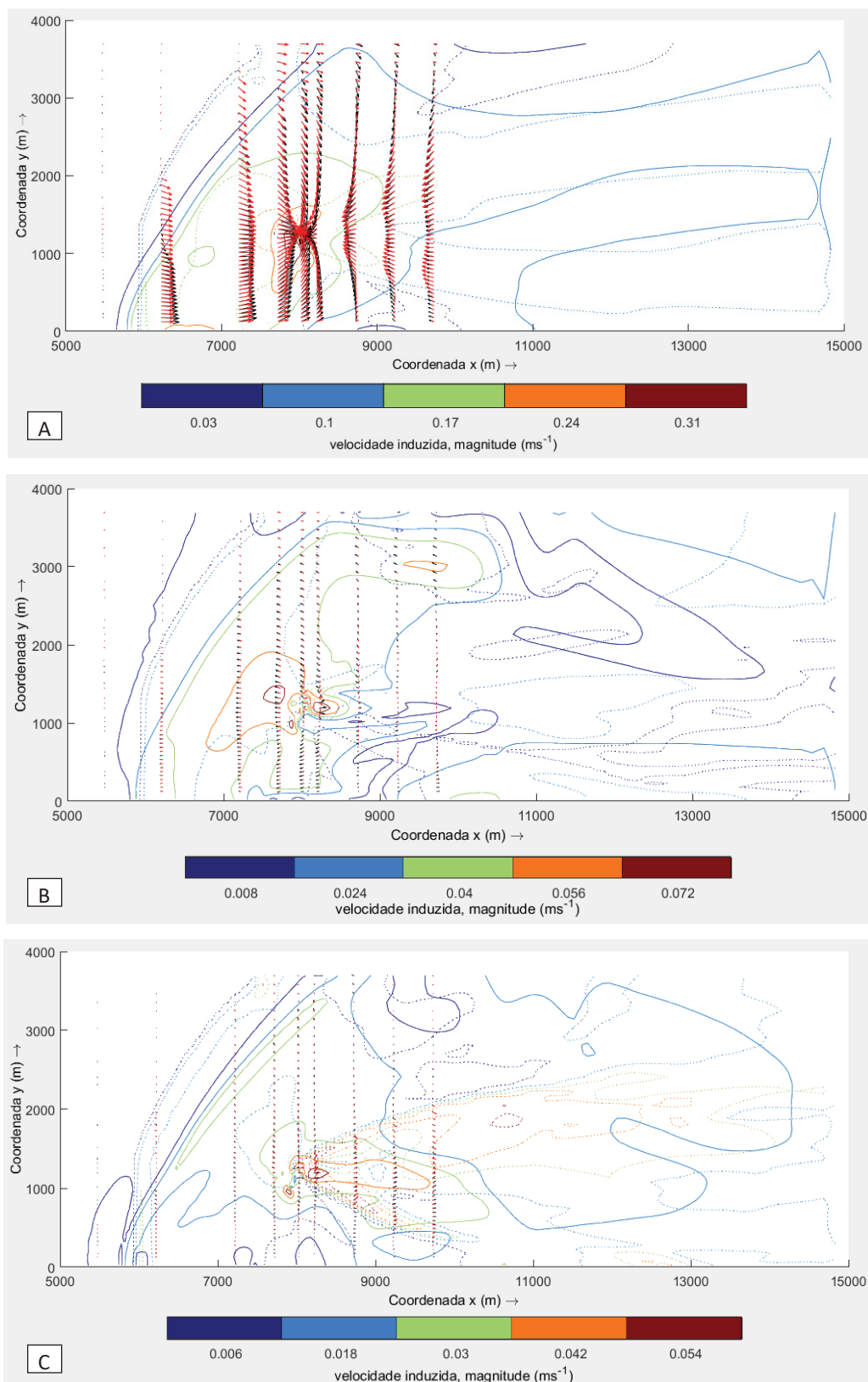


Figura 130 - Velocidade induzida obtida para o caso teste 6 (A) na superfície do canal (L1), (B) na camada do meio do canal (L5), (C) na camada de fundo do canal (L10). Isolinhas representam a magnitude da velocidade, (—) acoplamento dinâmico e (:) acoplamento passivo, e os vetores projetados no plano xy indicam a direção da velocidade, (←) acoplamento dinâmico, (↖) acoplamento passivo. Escala dos vetores: $1 \text{ ms}^{-1} = 1000 \text{ m}$.